

Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/FR05/000587

International filing date: 11 March 2005 (11.03.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: FR
Number: 0402656
Filing date: 15 March 2004 (15.03.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 20 May 2005 (20.05.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse



BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 11 MARS 2005

Pour le Directeur général de l'Institut
national de la propriété industrielle
Le Chef du Département des brevets

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Planche', enclosed within a large, stylized oval loop.

Martine PLANCHE

INSTITUT
NATIONAL DE
LA PROPRIÉTÉ
INDUSTRIELLE

SIEGE
26 bis, rue de Saint-Petersbourg
75800 PARIS cedex 08
Téléphone : 33 (0)1 53 04 53 04
Télécopie : 33 (0)1 53 04 45 23
www.inpi.fr





26 bis, rue de Saint Pétersbourg - 75800 Paris Cedex 08

Pour vous informer : INPI DIRECT

N° Indigo 0 825 83 85 87
0,15 € TTC/mn

Télécopie : 33 (0)1 53 04 52 65

Réservé à l'INPI

BREVET D'INVENTION CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI



N° 11354*04

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE

page 1/2

BR1

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 540 @ W / 030103

REMISE DES PIÈCES DATE 15 MARS 2004 LIEU 75 INPI PARIS 34 SP N° D'ENREGISTREMENT 0402656 NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI DATE DE DÉPÔT ATTRIBUÉE PAR L'INPI 15 MARS 2004		1 NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE Cabinet Ballot 122 rue Edouard Vaillant 92593 Levallois-Perret Cedex	
Vos références pour ce dossier (facultatif) 017066 FR JPB/YL			
Confirmation d'un dépôt par télécopie		<input type="checkbox"/> N° attribué par l'INPI à la télécopie	
2 NATURE DE LA DEMANDE		Cochez l'une des 4 cases suivantes	
Demande de brevet		<input checked="" type="checkbox"/>	
Demande de certificat d'utilité		<input type="checkbox"/>	
Demande divisionnaire		<input type="checkbox"/>	
<i>Demande de brevet initiale</i> <i>ou demande de certificat d'utilité initiale</i>		N° _____ Date _____ N° _____ Date _____	
Transformation d'une demande de brevet européen <i>Demande de brevet initiale</i>		<input type="checkbox"/> N° _____ Date _____	
3 TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum) Procédé de caractérisation géotechnique d'un fond subaquatique, utilisant une onde acoustique à large bande et à rasance multiple			
4 DÉCLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE FRANÇAISE		Pays ou organisation _____ N° _____ Date _____ Pays ou organisation _____ N° _____ Date _____ Pays ou organisation _____ N° _____ Date _____ <input type="checkbox"/> S'il y a d'autres priorités, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»	
5 DEMANDEUR (Cochez l'une des 2 cases)		<input type="checkbox"/> Personne morale <input checked="" type="checkbox"/> Personne physique	
Nom ou dénomination sociale		DEMOULIN	
Prénoms		Xavier	
Forme juridique			
N° SIREN		_____	
Code APE-NAF		_____	
Domicile ou siège	Rue	21 rue Ed. Manet	
	Code postal et ville	5 6 2 6 0 Larmor-Plage	
	Pays	France	
Nationalité		Française	
N° de téléphone (facultatif)		N° de télécopie (facultatif)	
Adresse électronique (facultatif)			
<input type="checkbox"/> S'il y a plus d'un demandeur, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»			

Remplir impérativement la 2^{ème} page



BREVET D'INVENTION CERTIFICAT D'UTILITÉ

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE
page 2/2

BR2

DB 540 W / 191203

REMISE DES PIÈCES DATE 15 MARS 2004 LIEU 75 INPI PARIS 34 SP N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI 0402656		Réservé à l'INPI	
6 MANDATAIRE (s'il y a lieu)			
Nom	BENTZ		
Prénom	Jean-Paul		
Cabinet ou Société	Cabinet BALLOT		
Nationalité	Française		
N° de pouvoir permanent et/ou de lien contractuel			
Adresse	Rue	122 rue Edouard Vaillant	
	Code postal et ville	92 15 19 13 LEVALLOIS-PERRET	
	Pays	FRANCE	
N° de téléphone (facultatif)	01 49 64 61 00		
N° de télécopie (facultatif)	01 49 64 61 20		
Adresse électronique (facultatif)			
7 INVENTEUR (S)		Les inventeurs sont nécessairement des personnes physiques	
Les demandeurs et les inventeurs sont les mêmes personnes		<input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non : Dans ce cas remplir le formulaire de Désignation d'inventeur(s)	
8 RAPPORT DE RECHERCHE		Uniquement pour une demande de brevet (y compris division et transformation)	
Établissement immédiat ou établissement différé		<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
		Choix à faire obligatoirement au dépôt (cf. Notice explicative Rubrique 8)	
9 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES		Uniquement pour les personnes physiques	
		<input type="checkbox"/> Requête pour la première fois pour cette invention (joindre un avis de non-imposition) <input type="checkbox"/> Obtenue antérieurement à ce dépôt pour cette invention (joindre une copie de la décision d'admission à l'assistance gratuite ou indiquer sa référence) : AG [] [] [] [] []	
10 SÉQUENCES DE NUCLEOTIDES ET/OU D'ACIDES AMINÉS		<input type="checkbox"/> Cochez la case si la description contient une liste de séquences	
Le support électronique de données est joint		<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
La déclaration de conformité de la liste de séquences sur support papier avec le support électronique de données est jointe			
Si vous avez utilisé l'imprimé «Suite», indiquez le nombre de pages jointes			
11 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire) BENTZ Jean-Paul 99.0308		VISA DE LA PRÉFECTURE OU DE L'INPI L. MARIELLO	

L'invention concerne, de façon générale, les techniques de prospection par excitation sonique.

Plus précisément, l'invention concerne un procédé de
5 caractérisation géotechnique d'un fond sub-aquatique, tel
qu'un fond sous-marin, recouvert d'une nappe d'eau de
hauteur totale déterminée, et comprenant une pluralité de
strates formant entre elles des interfaces de séparation,
présentant chacune des paramètres physiques propres et
10 s'étendant à des profondeurs diverses en dessous d'une
première strate qui forme une interface de séparation
avec l'eau, ce procédé comprenant au moins une phase
d'investigation, une phase de pré-traitement et une phase
d'analyse, la phase d'investigation incluant elle-même
15 une opération d'excitation acoustique, mise en œuvre en
émettant au moins vers le fond, depuis une source
acoustique immergée, une onde acoustique incidente de
signature fréquentielle connue, une opération
d'acquisition mise en œuvre en produisant, au moyen d'une
20 flûte d'au moins quatre récepteurs immergés, des signaux
de mesure respectifs résultant d'une détection d'ondes
acoustiques respectives réfléchies par le fond, et une
opération de relevé de données géométriques, la flûte
étant au moins approximativement alignée sur la source et
25 distante du fond, les récepteurs étant espacés les uns
des autres, et l'onde incidente étant émise dans chaque
fenêtre d'une succession de fenêtres temporelles
d'émission disjointes, et présentant une variation
temporelle de fréquence à l'intérieur de chaque fenêtre
30 d'émission.

Un procédé de ce type est par exemple décrit dans le
brevet US 6 151 556.

D'autres procédés sont également connus de l'homme du métier, et notamment ceux que décrivent les documents de brevets EP - 0 215 703 et EP - 0 553 053.

5

De façon plus générale, les systèmes acoustiques connus pour l'investigation des fonds sont soit des systèmes d'imagerie, soit des systèmes sismiques.

- 10 Les systèmes d'imagerie classiques utilisent des ondes acoustiques de fréquences élevées, typiquement supérieures à 30kHz, émises vers le fond et permettant d'établir une image de la surface du fond indépendamment du sous-sol en présence en se basant sur le mécanisme de
- 15 · rétro-diffusion.

Les systèmes sismiques usuels du type précédemment défini utilisent, en tant qu'émetteur, un boomer produisant un signal acoustique à très basse fréquence et présentant

20 donc l'avantage de pénétrer profondément dans le sous-sol.

Le signal issu des multiples réflexions et recueilli sur une flûte d'hydrophones et/ou de géophones tractée par un

25 navire en synchronisme avec le boomer est ainsi représentatif des couches profondes du sous-sol.

En revanche, les caractéristiques fréquentielles du signal émis à très basse fréquence sont mal contrôlées,

30 de sorte que ces systèmes ne fournissent que des indications qualitatives des strates profondes du sous-sol, à des profondeurs typiquement supérieures à 10

mètres, et avec des résolutions verticales typiquement supérieures à 1 mètre.

Les sondeurs de sédiment récents présentent l'avantage
5 d'utiliser des signaux contrôlés ("chirp" ou sources paramétriques) qui insonifient le fond verticalement à forte puissance. Toutefois, la réception des signaux, assurée par le même transducteur, limite significativement les performances pour des raisons
10 instrumentales (saturation électronique) et physiques (mélange de phénomènes de rétro-diffusion et de réflexion spéculaire, ambiguïté épaisseur/vitesse dans les couches).

15 Dans ce contexte, la présente invention vise à proposer un procédé répondant au besoin, aujourd'hui non satisfait, de permettre la détermination quantifiée des propriétés géotechniques du sous-sol d'un fond sub-aquatique sur les premiers mètres, typiquement sur les
20 cinq premiers mètres au moins, et avec une résolution au plus égale à cinquante centimètres.

A cette fin, le procédé de l'invention, par ailleurs conforme à la définition générique qu'en donne le
25 préambule ci-dessus, est essentiellement caractérisé en ce que la phase d'investigation inclut une opération de déplacement, concomitante avec les opérations d'excitation et d'acquisition, et mise en œuvre en déplaçant simultanément la source acoustique et la flûte
30 dans la nappe d'eau, en ce que la phase de pré-traitement est mise en œuvre en déduisant, à partir des signaux de mesure, de la signature de l'onde acoustique incidente, et des données géométriques, des signaux de réflexion

ayant atteint des récepteurs différents à la suite d'une même émission d'onde incidente, et en regroupant, sous forme de séries de signaux de réflexion recalés, des signaux de réflexion ayant atteint, sous des angles de rasance différents, des récepteurs différents en provenance d'une même zone du fond à la suite de différentes émissions de l'onde incidente, et en ce que la phase d'analyse est mise en œuvre en déduisant les paramètres physiques de chaque strate du fond, à partir des séries de signaux de réflexion recalés, par exploitation de la dépendance angulaire et fréquentielle du coefficient de réflexion de l'onde incidente sur chaque interface, chaque signal de réflexion recalé étant interprété comme une somme d'arrivées retardées et atténuées de rayons propres correspondant à la réflexion de l'onde incidente par les différentes strates de la zone du fond à laquelle correspond ce signal de réflexion recalé.

20

En pratique, chaque onde réfléchie atteignant le centre de la flûte dans une fenêtre temporelle de réception est avantageusement issue de la réflexion d'une onde incidente ayant atteint le fond sous un angle de rasance au plus égal à 70 degrés et au moins égal à 10 degrés, et de préférence compris entre 25 et 65 degrés.

Chaque récepteur est par exemple séparé de la source acoustique par une distance comprise entre environ 1 fois et environ 4 fois la hauteur d'eau moyenne sous les instruments, chaque récepteur pouvant par ailleurs être espacé d'un récepteur voisin par une distance comprise

entre environ 0.375 fois et environ 1 fois la hauteur moyenne suivant le nombre de ces récepteurs.

Selon un autre mode d'évaluation des distances, chaque
5 récepteur est typiquement séparé d'un récepteur voisin
par une distance correspondant à une différence d'angle
de rasance au moins égale à 2 degrés, et de préférence au
moins égale à 5 degrés, des signaux de réflexion
respectivement reçus par ce récepteur et par le récepteur
10 voisin.

De préférence, l'onde incidente présente, dans chaque
fenêtre d'émission, au moins une composante de fréquence
relativement basse, dont la fréquence est au moins égale
15 à 100 Hz, cette onde incidente présentant utilement
aussi, dans chaque fenêtre d'émission, au moins une
composante de fréquence relativement haute, dont la
fréquence est au plus égale à 8 kHz.

20 Dans un mode de réalisation possible de l'invention,
l'onde incidente peut ainsi présenter, dans chaque
fenêtre d'émission, une fréquence continûment variable
entre une composante de fréquence relativement basse et
une composante de fréquence relativement haute.

25 Pour obtenir à la fois une information suffisamment riche
et une séparation satisfaisante des ondes réfléchies, les
fenêtres temporelles d'émission ont chacune par exemple
une durée au moins égale à 0.1 seconde, et de préférence
30 au moins égale à 0.5 seconde, et sont répétées
périodiquement avec une période par exemple au moins
égale à 0.5 seconde et de préférence au moins égale à 1
seconde.

Dans son mode de réalisation préféré, le procédé de l'invention comprend, en amont de la phase d'analyse, une opération de détermination de la profondeur d'immersion
5 de la source acoustique et/ou de la profondeur d'immersion d'un point de la flûte et/ou de la hauteur d'eau.

La phase d'analyse est par exemple mise en œuvre en parcourant, de façon itérative, une boucle incluant une
10 opération de modélisation au cours de laquelle sont calculés, à partir de paramètres physiques fictifs virtuellement attribués à la première strate au moins de la pluralité de strates, et pour les différents
15 récepteurs, des signaux de réflexion recalés fictifs respectifs issus de signaux de mesure virtuellement produits par ces récepteurs en présence de ces paramètres fictifs, une opération de soustraction au cours de laquelle sont formés des écarts constatés entre les
20 signaux de réflexion recalés respectifs issus des signaux de mesure réellement produits par ces récepteurs et les signaux de réflexion recalés fictifs correspondants, et une opération d'optimisation et de rétroaction à l'issue de laquelle les paramètres
25 physiques fictifs sont révisés en fonction des écarts constatés.

Le procédé de l'invention permet ainsi une caractérisation géotechnique de chaque strate d'une
30 pluralité de strates d'un fond sub-aquatique au moyen de paramètres physiques choisis dans l'ensemble de paramètres qui comprend l'épaisseur de cette strate, la densité de cette strate, la vitesse du son dans cette

strate, l'atténuation du son dans cette strate, la rugosité de cette strate, et un gradient de célérité du son à l'intérieur de cette strate.

5 Dans son mode de réalisation préféré, le procédé de l'invention permet d'identifier les différentes strates du sous-sol sub-aquatique avec des résolutions verticales de l'ordre de dix centimètres.

10 D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront clairement de la description qui en est faite ci-après, à titre indicatif et nullement limitatif, en référence aux dessins annexés, dans lesquels :

15 - la figure 1 est une vue schématique en perspective d'un équipement mettant en œuvre le procédé de l'invention ;

- la figure 2 est un diagramme schématique présentant de façon approximativement chronologique les principales
20 phases et opérations du procédé de l'invention ;

- la figure 3, composée des schémas 3A à 3C, illustre de manière intuitive et partielle l'étape RECAL de recalage et de regroupement de signaux de réflexion mise en oeuvre
25 pendant le déroulement du procédé de l'invention, cette étape conduisant notamment à regrouper des signaux de réflexion provenant d'une même zone du fond;

- la figure 4, composée des schémas 4A et 4B, complète
30 l'illustration de l'étape RECAL;

- la figure 5, composée des schémas 5A et 5B, illustre partiellement les mécanismes de propagation acoustique

multiple dans l'eau, et leur exploitation dans l'invention;

- la figure 6 illustre partiellement les mécanismes de propagation acoustique multiple dans le fond sub-aquatique;

- les figures 7A à 7J sont des diagrammes représentant, en fonction du temps t exprimé en nombre d'échantillons, l'amplitude relative A de signaux de mesure respectivement produits par 10 récepteurs successifs de plus en plus éloignés de la source acoustique et séparés les uns des autres par une distance importante, et mettant en évidence l'influence des angles avec lesquels les ondes se réfléchissent au fond ; et

- les figures 8A à 8J sont des diagrammes représentant, en fonction du temps t exprimé en nombre d'échantillons, l'amplitude relative A de signaux de mesure respectivement produits par 5 récepteurs successifs de plus en plus éloignés de la source acoustique et pour une modulation de basses fréquences à gauche et pour une modulation de fréquences hautes à droite, mettant en évidence l'influence des fréquences utilisées.

NOTATIONS

Le lecteur trouvera ci-après quelques-uns des symboles utilisés pour identifier les différentes entités impliquées dans la mise en œuvre de l'invention :

"i" est un indice compteur utilisé pour numérotter chaque hydrophone en le distinguant ainsi des autres hydrophones;

"j" est un indice compteur utilisé pour numérotter chaque strate du fond sub-aquatique en la distinguant ainsi des autres strates du fond;

5

"J" est un nombre entier désignant le nombre total de strates observables;

"k" est un indice compteur utilisé pour numérotter chaque rayon propre d'une onde acoustique en le distinguant des autres rayons propres;

10

"l" est un indice compteur utilisé pour numérotter chaque émission d'une onde acoustique incidente (encore appelée "tir") en la distinguant ainsi des autres émissions d'une onde acoustique;

15

"n" est un indice compteur utilisé pour numérotter chaque boucle d'itération de la phase d'analyse en la distinguant ainsi des autres boucles d'itération;

20

"e" est un indice attribué à une valeur finale exacte d'un paramètre;

$s(t)$ désigne l'onde acoustique incidente;

25

$s_i(t,l)$ désigne le signal de mesure reçu sur le $i^{\text{ème}}$ hydrophone à la suite du $l^{\text{ème}}$ tir;

$e_i(t,l)$ désigne l'enveloppe de l'intercorrélation entre l'onde acoustique incidente $s(t)$ et le signal de mesure $s_i(t,l)$;

30

$rf_i(t, l)$ désigne le signal de réflexion associé au signal de mesure $s_i(t, l)$ par application à l'enveloppe $e_i(t, l)$ d'une fenêtre de réception;

5 $Rf_i(t, B)$ désigne un signal de réflexion recalé, issu du signal de réflexion $rf_i(t, l)$ par une étape de recalage RECAL et associé au fond B;

$Rfs_i(t, B)$ désigne un signal de réflexion recalé fictif,
10 obtenu par simulation;

$Rfs_i^k(t, B)$ désigne le $k^{i\text{ème}}$ rayon propre du signal de réflexion recalé $Rf_i(t, B)$; et

15 $\theta_i^k(j)$ désigne l'angle de rasance sur la $j^{i\text{ème}}$ strate du $k^{i\text{ème}}$ rayon propre du signal de réflexion recueilli sur le $i^{i\text{ème}}$ hydrophone.

Comme indiqué précédemment, l'invention concerne (figure
20 1) un procédé de caractérisation géotechnique d'un fond sub-aquatique B, tel qu'un fond sous-marin, recouvert d'une nappe d'eau de hauteur totale H déterminée.

Ce fond B comprend une pluralité de strates telles que
25 F1, F2, etc. (figure 6), génériquement notées Fj et présentant chacune des paramètres physiques propres.

La première strate F1 forme une interface avec l'eau, les autres strates s'étendant en dessous de cette première
30 strate à des profondeurs diverses.

Le procédé de l'invention vise, pour chacune des strates Fj d'un ensemble de strates comprenant typiquement, mais

non limitativement, entre deux et cinq strates, à déterminer plusieurs paramètres distinctifs de cette strate, tels que l'épaisseur h_j de cette strate, sa densité ρ_j , la vitesse du son C_j dans cette strate, et
5 plus précisément la vitesse C_{pj} pour des ondes de compression et la vitesse C_{sj} pour des ondes de cisaillement, l'atténuation du son α_j dans cette strate, et plus précisément l'atténuation α_{pj} pour des ondes de compression et l'atténuation α_{sj} pour des ondes de
10 cisaillement, ainsi, éventuellement, que la rugosité dans cette strate, ou un gradient de célérité du son.

Le procédé de l'invention comprend essentiellement une phase d'investigation INVESTIG, une phase de pré-
15 traitements PRE_TRAIT et une phase d'analyse ANA.

La phase d'investigation INVESTIG inclut elle-même une opération de déplacement DEPL, une opération d'excitation acoustique EXCIT, une opération d'acquisition ACQUI, et
20 une opération RELEV de relevé de données non acoustiques, ces opérations étant mises en œuvre de façon globalement simultanée.

L'opération de déplacement DEPL consiste à déplacer dans la nappe d'eau, au moyen d'un navire N et à vitesse
25 réduite idéalement constante, une source acoustique 1 et une flûte 2 au-dessus du fond B, la flûte 2 comprenant par exemple trois, quatre, ou cinq récepteurs acoustiques 21 à 24, encore appelés hydrophones.

30 L'opération RELEV de relevé de données non acoustiques comprend elle-même une opération CAPT de capture de données environnementales et une opération de repérage REPER.

L'opération CAPT de capture de données environnementales consiste à enregistrer à chaque instant t les profondeurs de la source acoustique 1 et d'un point de la flûte 2, ainsi que la hauteur d'eau H .

L'opération de repérage REPER consiste à enregistrer, à chaque instant t , les coordonnées X et Y du point du navire N .

10

L'opération EXCIT d'excitation acoustique est mise en œuvre en émettant de façon aussi isotrope que possible, notamment vers le fond B et depuis la source acoustique immergée 1, l'onde acoustique incidente $s(t)$, de signature fréquentielle connue.

L'opération d'acquisition ACQUI est, quant à elle, mise en œuvre en produisant, au moyen des récepteurs immergés 21 à 24, des signaux de mesure respectifs $s_1(t, l)$, $s_2(t, l)$, $s_3(t, l)$ et $s_4(t, l)$ (génériquement notés $s_i(t)$) en réponse à une détection d'ondes acoustiques respectives propagée dans l'eau, et en enregistrant ces signaux en fonction du temps t .

Comme le montre la figure 1, la source 1 et la flûte 2 restent à distance du fond B et se trouvent respectivement immergées à des profondeurs Z_s et Z_r , éventuellement égales, la flûte 2 étant au moins approximativement alignée sur la source 1 et au moins approximativement parallèle au fond B .

Les profondeurs d'immersion de la source 1 et des récepteurs 21 à 24 sont par exemple enregistrées par des

capteurs de pression, la profondeur d'eau H étant par exemple enregistrée à l'aide d'un sondeur de bathymétrie.

La hauteur totale de la nappe d'eau au-dessus du fond B étant notée H , la source 1 et la flûte 2 se trouvent ainsi globalement, par rapport au fond B , à une hauteur moyenne H_m typiquement comprise entre 10 mètres et 20 mètres.

Les récepteurs 21 à 24 sont espacés les uns des autres, chaque récepteur étant séparé d'un récepteur voisin par une distance d qui peut être constante ou évolutive le long de la flûte 2.

La flûte 2 est considérée comme délimitée entre les deux récepteurs extrêmes 21 et 24, qui sont donc équidistants du centre 20 de cette flûte. On note D_i , la distance horizontale séparant l'émetteur du $i^{\text{ème}}$ hydrophone et Z_i la profondeur du $i^{\text{ème}}$ hydrophone.

La phase d'analyse ANA, qui est destinée à permettre l'identification des paramètres physiques tels que h_j , ρ_j , C_j , α_j de chaque strate F_j du fond B , exploite à cette fin la signature fréquentielle de l'onde acoustique incidente $s(t)$, et les signaux de mesure $s_i(t, l)$ des différents récepteurs 21 à 24.

Le procédé de l'invention concentre d'abord son analyse sur les signaux $s_i(t)$ propagés entre la source 1 et les récepteurs 21 à 24.

Pour ce faire, l'onde incidente $s(t)$, aussi isotrope que possible, est émise par la source 1, de directivité

connue, dans des fenêtres temporelles d'émission successives disjointes, et le signal de mesure $s_i(t, l)$ de chaque récepteur est lui-même analysé dans des fenêtres temporelles de réception successives disjointes, au cours
5 desquelles sont détectés les signaux propagés.

Dans ces conditions, chaque signal reçu $s_i(t)$ est constitué de répliques atténuées et retardées du signal émis $s(t)$ pour le tir noté T1, la structure du signal
10 reçu $s_i(t)$ étant ainsi fonction de la géométrie du trajet multiple que l'onde acoustique parcourt dans l'eau (figure 5).

Ce trajet multiple comprend principalement un trajet
15 direct de l'onde acoustique depuis la source 1 jusqu'à chacun des récepteurs 21 à 24, un trajet dit "réfléchi fond" de l'onde acoustique depuis la source 1 jusqu'à chacun des récepteurs 21 à 24 via réflexion sur le fond, l'onde acoustique ayant parcouru ce trajet donnant
20 naissance au signal de réflexion $rf_i(t, l)$, et un trajet dit "réfléchi surface" de l'onde acoustique depuis la source 1 jusqu'à chacun des récepteurs 21 à 24 après réflexion à la surface de l'eau.

25 Dans le cas particulier des fonds à faible hauteur d'eau H ou "petits fonds", on utilisera avantageusement le trajet de réfléchi surface, voire le trajet dit de "réfléchi fond-surface" impliquant une réflexion de l'onde acoustique à la fois sur le fond et sur la surface
30 entre son émission par la source 1 et sa détection par l'un des récepteurs 21 à 24.

La mesure des temps d'arrivée respectifs de ces trajets multiples dans l'eau permet d'une part de déterminer avec précision la géométrie du dispositif à l'instant de la mesure et d'autre part d'établir des fenêtres de
5 réception à l'intérieur desquelles se concentrera l'analyse des réfléchis fond.

Plus précisément, le procédé de l'invention concentre son analyse sur les signaux de mesure issus d'ondes
10 réfléchies une seule fois par le même fond B. Comme indiqué sur la figure 3, dont les différents schémas 3A à 3C correspondent à des tirs différents, un ordonnancement de plusieurs tirs consécutifs permet alors de recueillir les signaux notés $Rf_i(t,B)$ issus de la réflexion de
15 l'onde acoustique incidente sur une même zone de fond B et sous autant d'angles de rasance différents qu'il existe de récepteurs tels que 21 à 24.

Comme le montre la figure 4, les différents signaux de réflexion $rf_i(t,l)$ recueillis, lors d'un tir l , sur
20 chacun des récepteurs 21 à 24 dans une fenêtre d'observation correspondant à la réception d'un écho unique sur le fond doivent donc être respectivement associés à différents signaux de réflexion $rf_i(t,l')$,
25 $rf_i(t,l'')$, $rf_i(t,l''')$ etc., recueillis, lors d'autres tirs l' , l'' , l''' , etc. sur chacun des récepteurs 21 à 24 pour former les signaux dits de "réfléchi fond" ou de réflexion recalés $Rf_i(t,B)$, cette opération étant effectuée à une étape de recalage RECAL qui sera
30 détaillée ultérieurement.

En réalité, chaque signal de réfléchi fond $Rf_i(t,B)$ est lui-même composite en ce sens qu'il est formé (figure 6)

par la propagation, suivant un trajet multiple, de l'onde acoustique incidente dans le fond B, donnant lieu à des réflexions de cette onde incidente sur les différentes strates F_j du sous-sol sub-aquatique.

5

Dans ces conditions, chaque signal de réfléchi fond $Rf_i(t,B)$ peut être décrit sous la forme d'un ensemble de rayons propres notés $Rfs_i^k(t,B)$, l'indice k se rapportant au $k^{i\text{ème}}$ rayon propre associé à l'onde incidente $Rf_i(t,B)$.

10 Le rapport d'amplitude entre le signal temporel incident et réfléchi à l'interface F_j est directement proportionnel à la transformée de Fourier du coefficient de réflexion $R_j(f, \theta_i^k(j))$, l'indice k se rapportant ici à l'angle $\theta_i^k(j)$ avec lequel le $k^{i\text{ème}}$ rayon propre vient se
15 réfléchir sur l'interface F_j .

Or, ce coefficient de réflexion $R_j(f, \theta_i^k(j))$, dans le cadre d'une modélisation de Rayleigh, est relié aux paramètres géotechniques des différentes strates F_{j-1} F_j
20 du sous-sol.

Les signaux ainsi produits et exploités portent la signature de l'environnement rencontré par les ondes détectées, et contiennent donc une information
25 suffisamment riche et pertinente du fond B pour permettre d'en extraire sans ambiguïté les paramètres géotechniques des différentes strates F_j du sous-sol.

L'écho d'une onde incidente parvenant au fond B sous un
30 angle de rasance θ très rasant n'est pratiquement sensible qu'à l'atténuation acoustique de la strate F_1 .

L'écho d'une onde incidente parvenant au fond B sous une incidence perpendiculaire au fond B n'est pratiquement sensible qu'aux changements d'impédance acoustique et présente notamment le défaut de ne pas pouvoir permettre
5 sans ambiguïté la détermination du couple épaisseur-vitesse de chacune des strates.

De façon générale, il est donc préférable de récupérer des signaux ayant subi une réflexion à des angles de
10 rasance assez faibles sur chacune des strates F_j composant le fond.

Ainsi, des angles de rasance modérés sont nécessaires pour décrire la première strate F_1 et des angles de
15 rasance plus importants sont nécessaires pour décrire les couches plus profondes, F_2 , etc. Il est donc apparu très opportun de faire en sorte, pour l'invention, que chaque onde réfléchie atteignant l'un des récepteurs 21 à 24 dans une fenêtre temporelle de réception soit issue de la
20 réflexion d'une onde incidente ayant atteint le fond B sous un angle de rasance θ_k au plus égal à 70 degrés et au moins égal à 10 degrés.

Bien que les figures 5 et 6 soient à la fois totalement
25 schématiques et incomplètes compte tenu de leur mode de présentation simplifié et purement spatial, elles illustrent, de façon intuitive, ce que sont les trajets multiples de l'onde incidente, respectivement dans l'eau et dans le fond.

30

L'importance ci-dessus discutée des angles d'émission vis à vis du réfléchi fond peut être observée sur les courbes des figures 7A à 7J, correspondant respectivement aux

ondes recueillies sur des récepteurs disposés à des distances correspondant à des angles de rasance au fond décroissant de 72 à 25 degrés.

- 5 Ainsi, il apparaît que la courbe 7B, qui correspond à des angles de rasance forts, apporte peu d'information relativement à la courbe 7A puisque pour ces angles, le coefficient de réflexion de chaque strate est pratiquement indépendant de l'angle de rasance. De même,
- 10 il apparaît que les courbes 7I et 7J qui correspondent à des angles de rasance faibles n'apportent plus d'information puisque les ondes ne pénètrent pas dans le fond. Inversement, les figures 7B à 7I qui correspondent à un balayage angulaire pertinent, présentent une forte
- 15 variabilité permettant de retrouver sans ambiguïté les caractéristiques du fond.

De même, alors que la signature d'une onde incidente très basse fréquence est difficile à maîtriser, et qu'une onde

20 à haute fréquence présente une capacité de pénétration nulle dans les strates profondes, il est apparu très opportun, pour l'invention, d'utiliser une onde incidente présentant une composante de fréquence relativement basse au moins égale à 100 Hz, et une composante de fréquence

25 relativement haute au plus égale à 8 kHz, cette onde incidente présentant par exemple, dans chaque fenêtre d'émission, une fréquence continûment variable entre 100 Hz et 8 kHz.

- 30 La relation liant la profondeur de pénétration d'une onde acoustique incidente à la fréquence de cette onde est clairement illustrée par les figures 8A à 8J, qui représentent, pour 5 angles de rasance θ_i différents de

l'onde incidente compris entre 25 et 70 degrés, la réponse $Rf_i(t,B)$ du signal temporel réfléchi au fond, pour un signal d'émission compris entre 400 et 3200 Hz (figures 8A à 8E) et compris entre 5400 et 8200 Hz (figure 8F à 8J). Bien que présentant la même résolution temporelle que les signaux basse fréquence, les signaux haute fréquence sont sensiblement appauvris par l'atténuation des ondes dans les diverses strates.

10 Ainsi, grâce à un choix approprié de l'angle de rasance et grâce à une variation de la fréquence acoustique d'excitation, les paramètres physiques h_j , ρ_j , C_j , α_j de chaque strate F_j peuvent être déduits de l'onde incidente $s(t)$ et des signaux de mesure $s_i(t,l)$ par l'intermédiaire
15 d'un modèle physique faisant intervenir les coefficients de réflexion acoustique $R_j(\theta_i^k(j))$ des strates F_j du fond B vu par les rayons propres $Rfs_i^k(t,B)$, leur atténuation α_j , ainsi que leur dépendance fréquentielle.

20 Autrement dit, le modèle physique employé permet de tirer parti des dépendances angulaires du coefficient de réflexion et de la dépendance fréquentielle de l'atténuation dans les strates.

25 En pratique, il est souvent utile de faire en sorte que chaque onde réfléchie atteignant le centre 20 de la flûte 2 dans une fenêtre temporelle de réception soit issue de la réflexion d'une onde incidente ayant atteint le fond sous un angle de rasance θ_i au plus égal à 70 degrés et
30 au moins égal à 10 degrés, l'angle de rasance θ_i pouvant même le plus souvent être idéalement choisi dans une plage angulaire comprise entre 25 et 65 degrés.

Chaque récepteur 21 à 24 est alors séparé de la source acoustique 1 par une distance D comprise entre environ 1 fois et environ 4 fois la hauteur moyenne H_m , la valeur $D = H_m$ concernant essentiellement le récepteur 21 le plus
5 proche de la source 1, et la valeur $D = 4.H_m$ concernant plutôt le récepteur 24 le plus éloigné de la source 1.

Dans ces conditions, chaque récepteur, tel que 21 à 23, est espacé d'un récepteur voisin, tel que 22 à 24, par
10 une distance d permettant une discrétisation la plus régulière possible de l'angle de rasance.

En pratique, les fenêtres temporelles d'émission ont chacune une durée au moins égale à 0.1 seconde, et de
15 préférence plutôt au moins égale à 0.5 secondes. De façon générale, la durée choisie est un compromis entre un signal court minimisant les effets du mouvement du navire et un signal plus long augmentant le rapport signal à bruit.

20

Ces fenêtres d'émission sont répétées périodiquement avec une période dépendant de leur durée individuelle, au moins égale à 0.5 secondes, et de préférence plutôt au moins égale à 1 seconde. De façon générale, la durée du
25 silence entre deux tirs est un compromis entre une durée élevée permettant une séparation satisfaisante des signaux reçus et une durée faible permettant une plus grande résolution au sol.

30 Dans le cas préféré, les signaux de mesure sont analysés par tranche de 2 secondes et traités par tir, un tir correspondant à un jeu de signaux formé d'un signal émis

et des signaux de mesure correspondants reçus par les récepteurs respectifs 21 à 24.

Entre la phase d'investigation INVESTIG telle que
5 précédemment décrite, et la phase d'analyse ANA qui sera
davantage détaillée ultérieurement, le procédé de
l'invention comprend une phase de pré-traitement notée
PRE_TRAIT.

10 Cette phase de pré-traitement PRE_TRAIT comprend une
opération de filtrage FIL_COR, une opération de calcul
géométrique INVER_GEOM, et une étape de recalage RECAL.
Au cours de l'opération FIL_COR, chaque signal de mesure
 $s_i(t)$ est filtré pour normaliser ce signal en tenant
15 compte de la signature fréquentielle de l'onde acoustique
incidente $s(t)$.

Au cours de l'opération INVER_GEOM, la géométrie de
l'instrumentation lors du tir est recalculée et les
20 fenêtres temporelles de réception sont identifiées pour
pouvoir extraire les signaux de réflexion $rf_i(t,l)$.

Enfin, au cours de l'étape RECAL, chaque signal de mesure
extraît est associé à une position géographique du fond
25 repérée par ses coordonnées X et Y, et recalé de façon à
tenir compte du déplacement du navire entre chaque tir et
le tir suivant, l'étape RECAL produisant ainsi un jeu de
signaux de réflexion recalés $Rf_i(t,B)$ ayant vu une même
zone de fond B lors de tirs différents et sous des angles
30 de rasance différents.

Le filtrage effectué lors de l'opération FIL_COR, dit
"adapté", est obtenu par estimation de l'enveloppe de

l'intercorrélation entre le signal émis représenté par l'onde acoustique incidente $s(t)$, et chaque signal de mesure $s_i(t,l)$.

L'opération de filtrage consiste d'abord à effectuer la
5 corrélation :

$$c_i(t,l) = \int s(\tau) \cdot s_i(t-\tau,l) d\tau ,$$

puis à effectuer une extraction d'enveloppe du signal
10 $c_i(t,l)$ qui se réalise par exemple à l'aide d'une phase de démodulation selon $c_i(t,l) \cdot e^{-i2\pi f_c t}$, où f_c est la fréquence centrale du signal émis et suivie d'un filtrage passe-bas à la fréquence de coupure $F_{\text{coup}} > (F_{\text{max}} - F_{\text{min}})/2$ pour obtenir le signal $e_i(t,l)$.

15

Le calcul de la géométrie instrumentale exacte effectué lors de l'opération INVER_GEOM est basé sur l'identification des ondes réfléchies arrivant successivement sur les différents récepteurs 21 à 24.

20

Cette identification est obtenue par exemple à partir d'une détection de maximum à l'intérieur de fenêtres temporelles qui sont définies à partir de la géométrie a priori de l'instrumentation.

25

On compare les temps mesurés $(\tau_{e_i}^k)_m$ correspondant à cette détection aux temps $(\tau_{e_i}^k)_s$ issus d'un modèle de rayons propres en milieu stratifié fournissant l'expression de la réponse impulsionnelle théorique :

30

$$Rie_i(t) = \sum_{k=1}^N A_i^k \cdot \delta(t - \tau_{e_i}^k)$$

Equation 1

où N représente le nombre de trajets acoustiques pouvant
 relier un récepteur à l'émetteur, où t représente la
 variable temps, où τe_i^k représente le retard que
 présente, par rapport à l'émission de l'onde incidente,
 5 la réception d'une onde ayant suivi le k^{ième} trajet, où δ
 représente la fonction de Dirac, et où A_i^k représente
 l'amplitude relative, rapportée à celle de l'onde
 incidente émise, de l'onde ayant suivi le k^{ième} trajet et
 parvenant au récepteur avec un retard τe_i^k , la notation τe
 10 rappelant qu'il s'agit des retards associés au trajet
 multiple de l'onde acoustique dans l'eau.

Les retards associés au trajet direct et au réfléchi fond
 sont successivement donnés par :

15

$$\tau e_i^1 = \frac{\sqrt{(Zs - Zr_i)^2 + D_i^2}}{C_{moy}} \quad \text{et} \quad \tau e_i^2 = \frac{\sqrt{(2.H - Zs - Zr_i)^2 + D_i^2}}{C_{moy}}$$

où C_{moy} est la vitesse moyenne du son dans la colonne
 d'eau traversée par l'onde ayant suivi ce trajet et dans
 20 le cas particulier des grands fonds où les réflexions en
 surface ne sont pas exploitées.

Les instants théoriques prévus pour les différents rayons
 propres calculés sont comparés aux instants d'arrivées
 25 des ondes réellement détectées par les différents
 récepteurs 21 à 24.

En cas de différence non négligeable, une recherche de la
 géométrie exacte peut être effectuée par exemple par un
 30 algorithme de recuit simulé à 2.N variables (D_i et Zr_i)
 en minimisant une fonction de coût exprimée à partir des
 différences entre les instants théoriques associés aux

rayons propres et les instants de détection des ondes recueillies sur les N différents récepteurs 21 à 24.

Dans le cas particulier des petits fonds, d'autres arrivées telles que le réfléchi-surface et même les réfléchis surface-fond ou fond-surface sont détectés et permettent de s'affranchir des mesures préalables de H et Zs, grandeurs qui seront directement recherchées par l'algorithme d'inversion géométrique décrit ci-dessus.

10

A partir de l'information alors disponible, qui est constituée, pour chaque tir et chaque récepteur "i", par le signal $s_i(t)$ issu de ce récepteur et par la géométrie du système, il convient de sélectionner la plage temporelle correspondant à la fenêtre de réception dans laquelle le signal reçu sera analysé, c'est-à-dire la plage temporelle de réception de la seule contribution du signal de réflexion $rf_i(t,l)$.

20 Cette sélection est par exemple effectuée, dans le cas particulier des petits fonds, par un programme qui, pour chaque enveloppe du signal $e_i(t,l)$ issu du i^{ème} récepteur sélectionne la fenêtre temporelle définie par :

25

$$rf_i(t,l) = e_i(\tau e_i^3 - Nt_e : \tau e_i^4 - Nt_e, l)$$

où ":" est un séparateur symbolique placé entre la borne temporelle inférieure et la borne temporelle supérieure de la fenêtre de réception sélectionnée, où τe_i^3 représente le retard associé au réfléchi fond, où τe_i^4 représente le retard associé au premier réfléchi surface-fond, où N est un paramètre dépendant de la nature du

30

signal émis, et où t_e est la période d'échantillonnage de chaque récepteur, les indices 3 et 4 étant liés à un cas particulier des petits fonds dans lequel l'ordre d'arrivée des rayons propres serait successivement le
 5 trajet direct, le réfléchi-surface, le réfléchi-fond et le réfléchi surface-fond.

L'opération de recalage RECAL consiste à utiliser les données de position (X,Y) avec les positions des
 10 instruments associé au tir correspondant de façon à calculer les positions $B_i^1(X,Y)$ du fond vu par l'hydrophone i lors du tir 1. En répétant l'opération pour plusieurs tirs consécutifs, il devient possible de reconstituer le jeu de données $Rf_i(t,B)$ constitué des i
 15 réfléchis fonds ayant vu le fond $B(X,Y)$ sous les différents angles de rasance θ_i .

A titre d'exemple, pour une configuration définie par une distance de 10m entre la source 1 et le premier
 20 hydrophone 21 de la flûte, pour une flûte à 4 hydrophones séparés les uns des autres de 10m, horizontale et située à 10m au dessus du fond, pour un navire se déplaçant à la vitesse régulière de 5m/s et avec une durée de 2 secondes entre tirs successifs, on appliquera successivement un
 25 décalage de 1 tir pour le 2^{ième} hydrophone 22, de 2 tirs pour le 3^{ième} hydrophone 23, et de 3 tirs pour le 4^{ième} hydrophone 24 comme rappelé dans le Tableau 1 suivant.

N ^{ro} de tir	Signaux extraits	Décal.	Recalage
Tir 1	$rf_1(t,1)$	0	$rf_1(t,1) \rightarrow Rf_1(t,B)$
Tir 1+1	$rf_1(t,1+1)$	1	$rf_2(t,1+1) \rightarrow Rf_2(t,B)$
Tir 1+2	$rf_1(t,1+2)$	2	$rf_3(t,1+2) \rightarrow Rf_3(t,B)$

Tir 1+3	$rf_i(t, 1+3)$	3	$rf_4(t, 1+3) \rightarrow Rf_4(t, B)$
---------	----------------	---	---------------------------------------

Tableau 1: Principe de l'opération de recalage des tirs

Une fois identifiée et extraite, pour chaque récepteur,
 5 l'onde détectée ayant subi une réflexion unique et par le
 fond B, la phase d'analyse ANA est mise en œuvre pour
 permettre de déduire de cette onde les paramètres
 géotechniques du fond au moyen d'un modèle fondé sur
 l'expression du coefficient de réflexion de Rayleigh.

10

Comme évoqué précédemment, la modélisation des
 interactions des ondes acoustiques avec le fond et ses
 différentes strates est basée sur la représentation de
 chaque strate sur une base de plusieurs paramètres
 15 incluant l'épaisseur h de cette strate, la densité ρ (par
 exemple en g/cm^3), la vitesse du son $C_{p/s}$ (par exemple en
 m/s) et l'atténuation du son $\alpha_{p/s}$ (par exemple en dB/λ) ;
 les indices p et s se rapportant respectivement aux ondes
 de compression et aux ondes de cisaillement.

20

Dans les couches sédimentaires, la rugosité ou encore un
 gradient de célérité peuvent dans certains cas être
 ajoutés à ces principaux paramètres physiques.

25 Partant du fait que le réfléchi fond se décompose lui-
 même comme une somme de rayons propres réfléchis par les
 différentes strates du fond, on peut également en écrire
 sa réponse impulsionnelle selon :

30

$$Rf_b(t) = \sum_{k=1}^N A_i^k \cdot \mathcal{S}(t - \tau b_i^k)$$

τb_i^k se rapportant au fait qu'il s'agit du trajet multiple de l'onde acoustique dans le fond.

- 5 Considérant maintenant $E(t)$, l'autocorrélation de l'enveloppe du signal émis, on obtient $Rf_i(t)$ par :

$$Rf_{s_i}(t, B) = E(t) \otimes \sum_{k=1}^N A_i^k \delta(t - \tau b_i^k) = \sum_{k=1}^N A_i^k E(t - \tau b_i^k) = \sum_{k=1}^N rfs_i^k(t, B)$$

- 10 l'indice s précisant qu'il s'agit du réfléchi fond simulé.

Concernant la détermination de ces rayons propres, il s'agit en particulier de calculer les k angles de tirs
 15 (angle de rasance au niveau de la source 1) des k rayons propres recherchés.

On part de l'angle θ_i^0 défini par :

20
$$\theta_i^0 = A \tan\left(\frac{2.H - Z_s - Z_{r_i}}{D_i}\right)$$

On effectue alors une recherche dichotomique de l'angle de tir $\theta_i^k(0)$ entre θ_i^0 et $\theta_i^0 + \theta_{\max}$ en utilisant les relations :

25
$$\frac{\cos \theta_i^k(j)}{C_j} = \frac{\cos \theta_i^k(j+1)}{C_{j+1}}$$
 entre les strates F_j et F_{j+1} , en

notant $\theta_i^k(j)$ l'angle dans la couche F_j du rayon partant avec un angle de tir $\theta_i^k(0)$, et

$$D_i = \frac{(2.H - Zr_i - Zs)}{\tan \theta_i^k(0)} + \sum_{j=1} \frac{2.N(j,k).h(j)}{\tan \theta_i^k(j)} + \varepsilon$$

en considérant ici le $k^{\text{ième}}$ rayon propre du réfléchi fond associé à la géométrie du capteur i comme le rayon propre se réfléchissant au plus profond sur la $j^{\text{ième}}$ strate, et en notant $N(j,k)$ le nombre de réflexions du rayon k dans la couche F_j .

Un test doit préalablement être effectué pour s'assurer de l'existence de ce rayon $N(1,k)$.

Dans le cas où A_i est une fonction de la fréquence, on a :

$$Rfs_i(t, B) = \sum_{k=1}^N A_i^k(t) . E(t - \tau b_i^k) .$$

$$A_i^k(t) = FFT^{-1}(A_i^k(f))$$

Dans le cas particulier d'interfaces planes et sans réflexion multiple dans aucune couche,

$$A_i^k(f) = \left(\frac{1}{\sum_{j=0} d_j} \right) . e^{i2\pi f \cdot \sum_{j=0}^{j=J-1} d_j} . e^{-\sum_{j=0}^{j=J-1} \alpha_j(f) . d_j} . r_J(f, \theta_i^k(J-1)) . \prod_{j=1}^{j=J-1} (1 - r_j^2(f, \theta_i^k(j-1)))$$

où d_j est la distance parcourue dans la strate F_j , $t_j = d_j / c_j$ le temps correspondant, α_j l'atténuation du son dans la couche exprimée en Neper/m, et $R_j(f, \theta_i^k(j))$ le coefficient de réflexion à la $j^{\text{ième}}$ interface.

Le coefficient de réflexion de Rayleigh associé à une interface fluide-fluide est défini par :

$$r_j(f, \theta_i^k(j)) = \frac{\frac{\rho_{j+1} \cdot c_{j+1}}{\sin(\theta_i^k(j+1))} - \frac{\rho_j \cdot c_j}{\sin(\theta_i^k(j))}}{\frac{\rho_{j+1} \cdot c_{j+1}}{\sin(\theta_i^k(j+1))} + \frac{\rho_j \cdot c_j}{\sin(\theta_i^k(j))}}$$

où l'on utilise les célérités complexes :

$$c_j = \frac{C_j}{1 + \frac{i \cdot \alpha_j}{2 \cdot \pi \cdot 8,686}}$$

Ce modèle étant posé en amont de toute investigation, la phase d'analyse ANA peut l'utiliser pour extraire les paramètres géotechniques des différentes strates du sous-sol sub-aquatique à partir des signaux de réflexion recalés et corrigés $Rf_i(t, B)$ obtenus à la fin de la phase PRE_TRAIT.

Pour ce faire, la phase d'analyse ANA utilise par exemple une technique d'appariement de formes connue de l'homme de métier, auquel cas elle consiste à parcourir, de façon itérative, une boucle incluant une opération de modélisation MODEL, une opération de soustraction SOUST, et une opération d'optimisation et de rétroaction OPTI_RETR.

On rappelle que, par convention, l'indice "n" sera utilisé ci-après pour désigner de façon générique le nombre courant de fois que la boucle d'itération a été parcourue depuis le début de la phase ANA, et pour repérer toute grandeur obtenue au $n^{\text{ième}}$ pas du parcours itératif de cette boucle.

La modélisation MODEL consiste à calculer, à chaque pas n , les signaux de réflexion recalés fictifs respectifs $Rf_i^n(t, B_n)$ que produiraient les récepteurs 21 à 24 si le fond B était constitué par un fond noté B_n formé de
5 strates F_j définies par des paramètres physiques fictifs h_{nj} , ρ_{nj} , C_{nj} , α_{nj} virtuellement attribués à ces strates.

Les paramètres physiques fictifs initiaux h_{oj} , ρ_{oj} , C_{oj} , α_{oj} sont par exemple choisis sur la base d'indications
10 géologiques générales sur le site à explorer, ou à défaut au hasard dans des fourchettes de valeurs plausibles ou simplement possibles, les valeurs prises par les paramètres h_{nj} , ρ_{nj} , C_{nj} , α_{nj} pour les valeurs non nulles de n étant définies de proche en proche par le parcours
15 répété de la boucle d'itération.

A ces paramètres peut être ajouté le nombre J_n défini comme le nombre total de strates supposées, lors de l'exécution du $n^{ième}$ pas de la boucle d'itération, avoir
20 été détectées, ce nombre évoluant jusqu'à l'obtention, à l'issue de l'itération, du nombre total exact J_e de strates réellement détectées.

Pour l'obtention des paramètres exacts, la phase
25 d'analyse ANA comprend tout d'abord une opération de soustraction SOUST au cours de laquelle sont calculés les écarts Δ_{ni} que présentent, par rapport aux signaux de réflexion recalés fictifs $Rfs_i^n(t, B_n)$ préalablement calculés, les signaux de réflexion recalés filtrés et
30 corrigés $Rf_i(t, B_e)$.

Puis, la phase d'analyse ANA comprend une opération d'optimisation et de rétroaction OPTI_RETR à l'issue de

laquelle les paramètres physiques fictifs sont révisés en fonction des écarts constatés.

Pour ce faire, le procédé de l'invention calcule, à
5 chaque pas d'itération n , une fonction de coût donnée par exemple par:

$$K(n) = \sqrt{\sum_{i=1}^4 (\Delta_{ni})^2}$$

10 avec $\Delta_{ni} = Rfs_i^n(t, B_n) - Rf_i(t, B_e)$.

Cette fonction de coût est par exemple minimisée selon un algorithme de recuit simulé pour produire une réponse impulsionnelle affinée $Rfs_i^{n+1}(t, B_{n+1})$ définissant un
15 nouveau fond B_{n+1} utilisé dans un nouveau pas d'itération de la phase ANA, le processus convergeant vers la production de paramètres exacts h_{ej} , ρ_{ej} , C_{ej} , α_{ej} des différentes strates j .

20 Le tableau ci-dessous donne un exemple de cas concret traité.

Géométrie :
H=25m, Zs=7m, Zr _i =8m, D ₁ =12m, d _i =5m, J _e = 5
Fond :
Cp1 ^e =1750m/s; ρ 1 ^e =1.8; α 1 ^e =0.5; h1 ^e =0.75m;
Cp2 ^e =1970m/s; ρ 2 ^e =1.93; α 2 ^e =0.4; h2 ^e =1.75m;
Cp3 ^e =1793m/s; ρ 3 ^e =1.85; α 3 ^e =0.5; h3 ^e =0.45m;
Cp4 ^e =2050m/s; ρ 4 ^e =2.; α 4 ^e =0.38; h4 ^e =2.25m;
Cp5 ^e =3000m/s; ρ 5 ^e =2.3; α 5 ^e =0.2; Cs5 ^e =1300m/s; α 5s ^e =0.3

Comme le comprendra l'homme du métier, au lieu d'utiliser une fonction de coût telle que $K(n)$ calculée au moyen une distance euclidienne, la phase d'analyse ANA pourrait tout aussi bien utiliser la recherche d'un maximum de

5 corrélation entre les signaux $Rfs_i^n(t, B_n)$ et $Rf_i(t, B_e)$.

Comme néanmoins il s'agit, dans l'un et l'autre de ces deux cas, de révéler des écarts entre ces signaux et de faire évoluer le signal $Rfs_i^n(t, B_n)$ dans un sens propre à

10 réduire ces écarts, les opérations précédemment évoquées de soustraction SOUST et de formation de tels écarts doivent être ici comprises dans un sens fonctionnel large incluant notamment une telle recherche de maximum de corrélation.

15

REVENDICATIONS.

1. Procédé de caractérisation géotechnique d'un fond
5 sub-aquatique (B), tel qu'un fond sous-marin, recouvert
d'une nappe d'eau de hauteur totale (H) déterminée, et
comprenant une pluralité de strates (F1, F2) formant
entre elles des interfaces de séparation, présentant
chacune des paramètres physiques propres (h_j , ρ_j , C_j , α_j)
10 et s'étendant à des profondeurs diverses en dessous d'une
première strate (F1) qui forme une interface de
séparation avec l'eau, ce procédé comprenant au moins une
phase d'investigation (INVESTIG), une phase de pré-
traitement (PRE_TRAIT) et une phase d'analyse (ANA), la
15 phase d'investigation (INVESTIG) incluant elle-même une
opération (EXCIT) d'excitation acoustique, mise en œuvre
en émettant au moins vers le fond (B), depuis une source
acoustique (1) immergée, une onde acoustique incidente
($s(t)$) de signature fréquentielle connue, une opération
20 d'acquisition (ACQUI) mise en œuvre en produisant, au
moyen d'une flûte (2) d'au moins quatre récepteurs (21 à
24) immergés, des signaux de mesure respectifs ($s_i(t, l)$)
résultant d'une détection d'ondes acoustiques respectives
réfléchies par le fond (B), et une opération de relevé
25 (RELEV) de données géométriques ($Zs(t)$, $Zr(t)$, $H(t)$,
 $X(t)$, $Y(t)$), la flûte (2) étant au moins
approximativement alignée sur la source (1) et distante
du fond (B), les récepteurs (21 à 24) étant espacés les
uns des autres, et l'onde incidente ($s(t)$) étant émise
30 dans chaque fenêtre d'une succession de fenêtres
temporelles d'émission disjointes, et présentant une
variation temporelle de fréquence à l'intérieur de chaque
fenêtre d'émission, caractérisé en ce que la phase

d'investigation (INVESTIG) inclut une opération de déplacement (DEPL), concomitante avec les opérations d'excitation (EXCIT) et d'acquisition (ACQUI), et mise en œuvre en déplaçant simultanément la source acoustique (1) et la flûte (2) dans la nappe d'eau, en ce que la phase de pré-traitement (PRE_TRAIT) est mise en œuvre en déduisant, à partir des signaux de mesure $s_i(t,l)$, de la signature de l'onde acoustique incidente ($s(t)$), et des données géométriques ($Zs(t)$, $Zr(t)$, $H(t)$, $X(t)$, $Y(t)$), des signaux de réflexion $rf_i(t,l)$ ayant atteint des récepteurs différents (21 à 24) à la suite d'une même émission d'onde incidente, et en regroupant, sous forme de séries de signaux de réflexion recalés ($Rf_i(t,B)$), des signaux de réflexion $rf_i(t,l)$ ayant atteint, sous des angles de rasance (θ_i) différents, des récepteurs différents (21 à 24) en provenance d'une même zone du fond à la suite de différentes émissions de l'onde incidente, et en ce que la phase d'analyse (ANA) est mise en œuvre en déduisant les paramètres physiques (h_j , ρ_j , C_j , α_j) de chaque strate (F1 à F4) du fond, à partir des séries de signaux de réflexion recalés ($Rf_i(t,B)$), par exploitation de la dépendance angulaire et fréquentielle du coefficient de réflexion de l'onde incidente sur chaque interface, chaque signal de réflexion recalé ($Rf_i(t,B)$) étant interprété comme une somme d'arrivées retardées et atténuées de rayons propres correspondant à la réflexion de l'onde incidente par les différentes strates de la zone du fond à laquelle correspond ce signal de réflexion recalé ($Rf_i(t,B)$).

30

2. Procédé de caractérisation géotechnique suivant la revendication 1, caractérisé en ce que chaque onde réfléchie atteignant un récepteur est issue de la

réflexion d'une onde incidente ayant atteint le fond sous un angle de rasance (θ_i) au plus égal à 70 degrés et de préférence au plus égal à 65 degrés.

5 3. Procédé de caractérisation géotechnique suivant l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que chaque onde réfléchie atteignant un récepteur est issue de la réflexion d'une onde incidente ayant atteint le fond sous un angle de rasance (θ_i) au
10 moins égal à 10 degrés et de préférence au moins égal à 25 degrés.

4. Procédé de caractérisation géotechnique suivant l'une quelconque des revendications précédentes,
15 caractérisé en ce que chaque récepteur (21 à 24) est séparé d'un récepteur voisin (22 à 24) par une distance (d) correspondant à une différence d'angle de rasance au moins égale à 2 degrés, et de préférence au moins égale à 5 degrés, des signaux de réflexion respectivement reçus
20 par ce récepteur et par le récepteur voisin.

5. Procédé de caractérisation géotechnique suivant l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'onde incidente présente, dans
25 chaque fenêtre d'émission, au moins une composante de fréquence relativement basse, dont la fréquence est au moins égale à 100 Hz.

6. Procédé de caractérisation géotechnique suivant
30 l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'onde incidente présente, dans chaque fenêtre d'émission, au moins une composante de

fréquence relativement haute, dont la fréquence est au plus égale à 8 kHz.

5 7. Procédé de caractérisation géotechnique suivant l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'onde incidente présente, dans chaque fenêtre d'émission, une fréquence continûment variable entre une composante de fréquence relativement basse et une composante de fréquence relativement haute.

10 8. Procédé de caractérisation géotechnique suivant l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les fenêtres temporelles d'émission ont chacune une durée au moins égale à 0.1 seconde et de
15 préférence au moins égale à 0.5 seconde.

9. Procédé de caractérisation géotechnique suivant l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les fenêtres temporelles d'émission
20 sont répétées périodiquement avec une période au moins égale à 0.5 seconde et de préférence au moins égale à 1 seconde.

10. Procédé de caractérisation géotechnique suivant
25 l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les paramètres physiques sont au moins en partie choisis dans l'ensemble de paramètres comprenant l'épaisseur (h), la densité (ρ), la vitesse du son (C_p , C_s), l'atténuation du son (α_p , α_s), la rugosité,
30 et un gradient de célérité du son.

11. Procédé de caractérisation géotechnique suivant l'une quelconque des revendications précédentes,

caractérisé en ce qu'il comprend, en amont de la phase d'analyse (ANA), une opération (CAPT) de détermination de la profondeur d'immersion (Z_s) de la source acoustique et/ou de la profondeur d'immersion (Z_r) d'un point de la
5 flûte et/ou de la hauteur d'eau H.

12. Procédé de caractérisation géotechnique suivant la revendication 10, caractérisé en ce que la phase d'analyse (ANA) est mise en œuvre en parcourant, de façon
10 itérative, une boucle incluant une opération de modélisation (MODEL_FOND) au cours de laquelle sont calculés, à partir de paramètres physiques fictifs (h_{nj} , ρ_{nj} , C_{nj} , α_{nj}) virtuellement attribués à la première strate (F1) au moins de la pluralité de strates, et pour les
15 différents récepteurs (21 à 24), des signaux de réflexion recalés fictifs respectifs ($Rfs_i^n(t, B_n)$) issus de signaux de mesure virtuellement produits par ces récepteurs (21 à 24) en présence de ces paramètres fictifs (h_{nj} , ρ_{nj} , C_{nj} , α_{nj}), une opération de soustraction (SOUST) au cours de
20 laquelle sont formés des écarts (Δ_{ni}) constatés entre les signaux de réflexion recalés respectifs ($Rf_i(t, B)$) issus des signaux de mesure ($s_i(t, 1)$) réellement produits par ces récepteurs (21 à 24) et les signaux de réflexion recalés fictifs correspondants ($Rfs_i^n(t, B_n)$), et une
25 opération d'optimisation et de rétroaction (OPTI_RETR) à l'issue de laquelle les paramètres physiques fictifs sont révisés en fonction des écarts constatés.

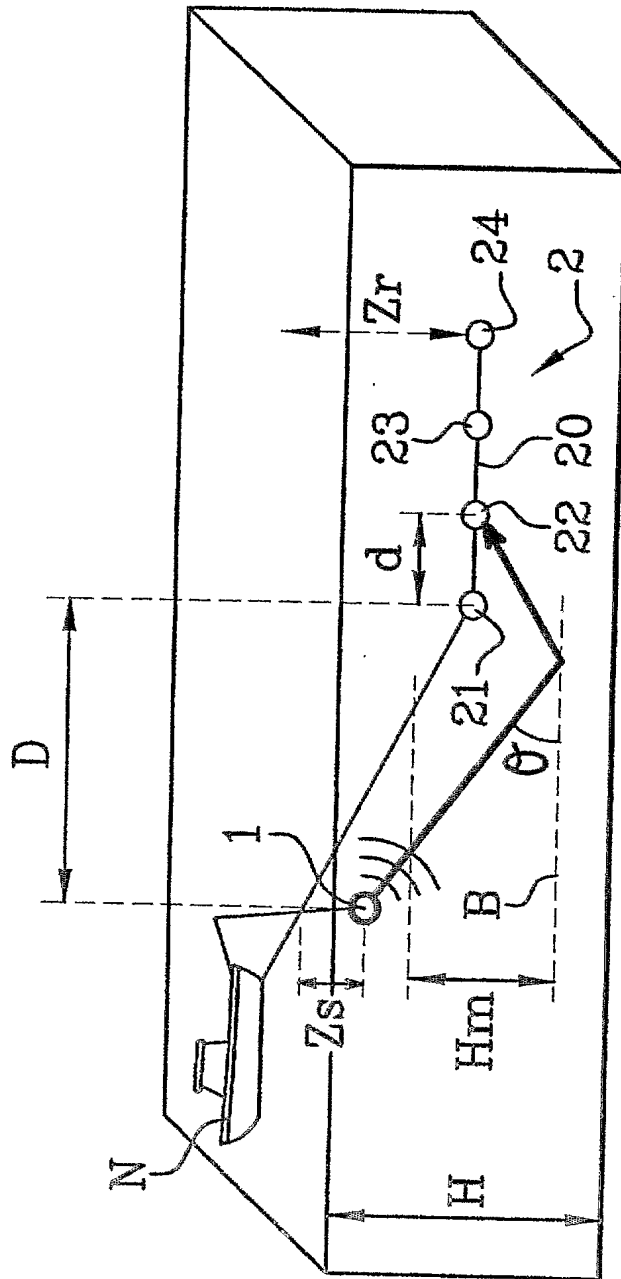


Fig. 1

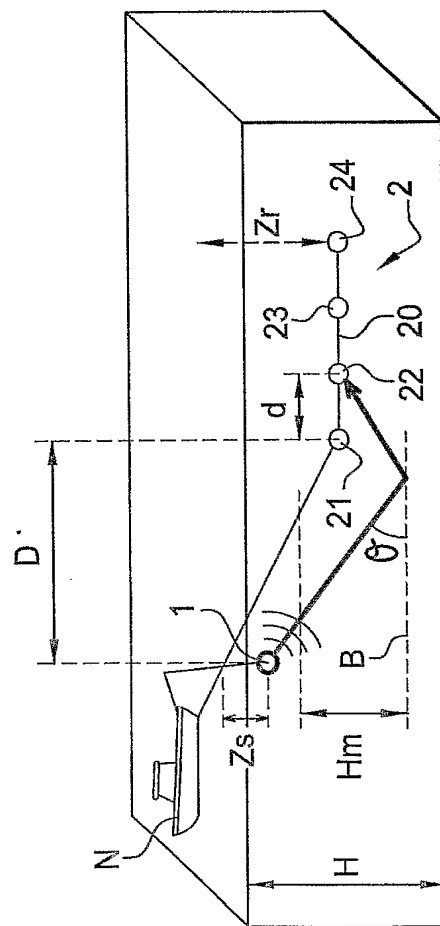


Fig. 1

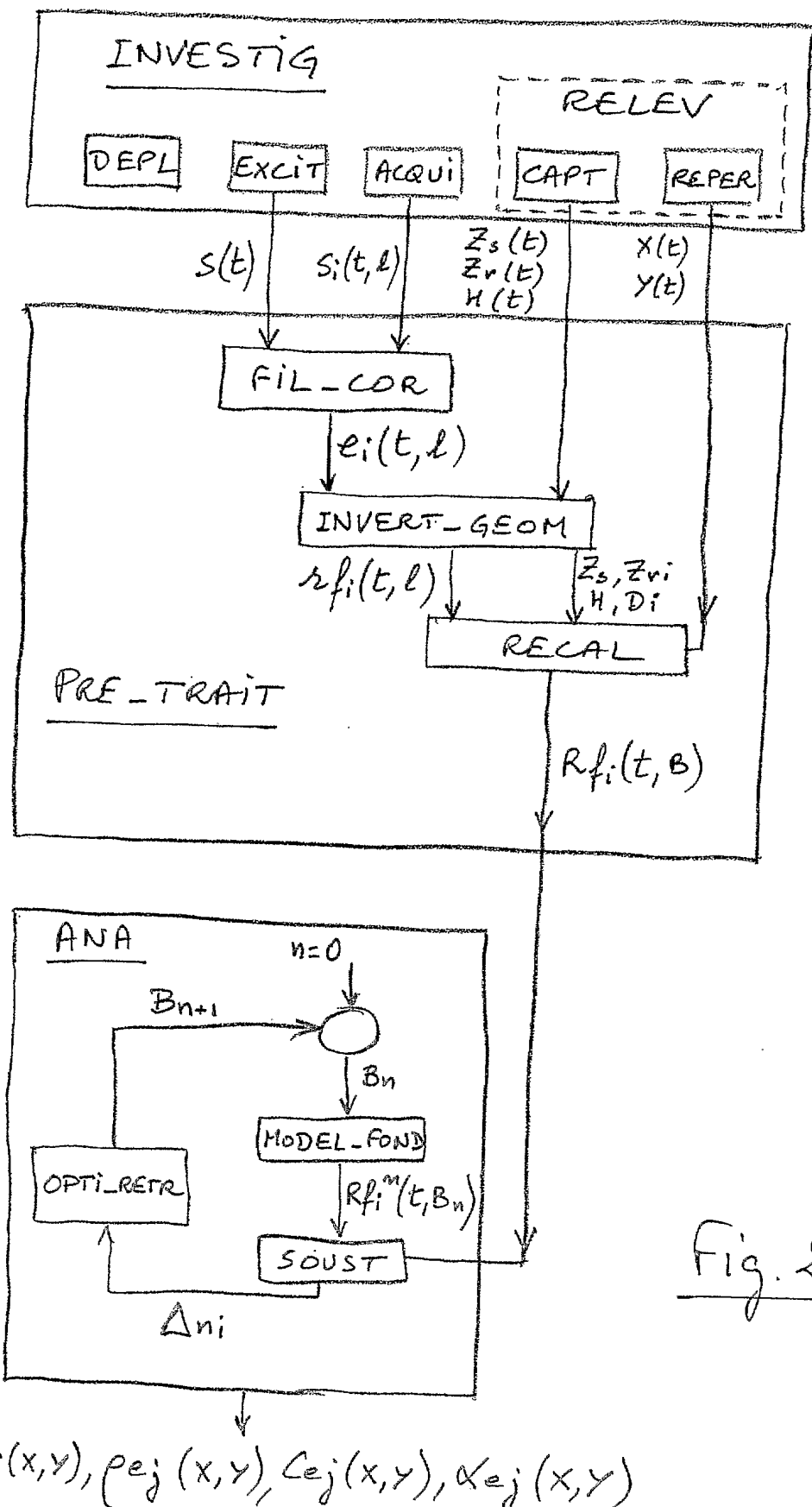


Fig. 2

2 / 6

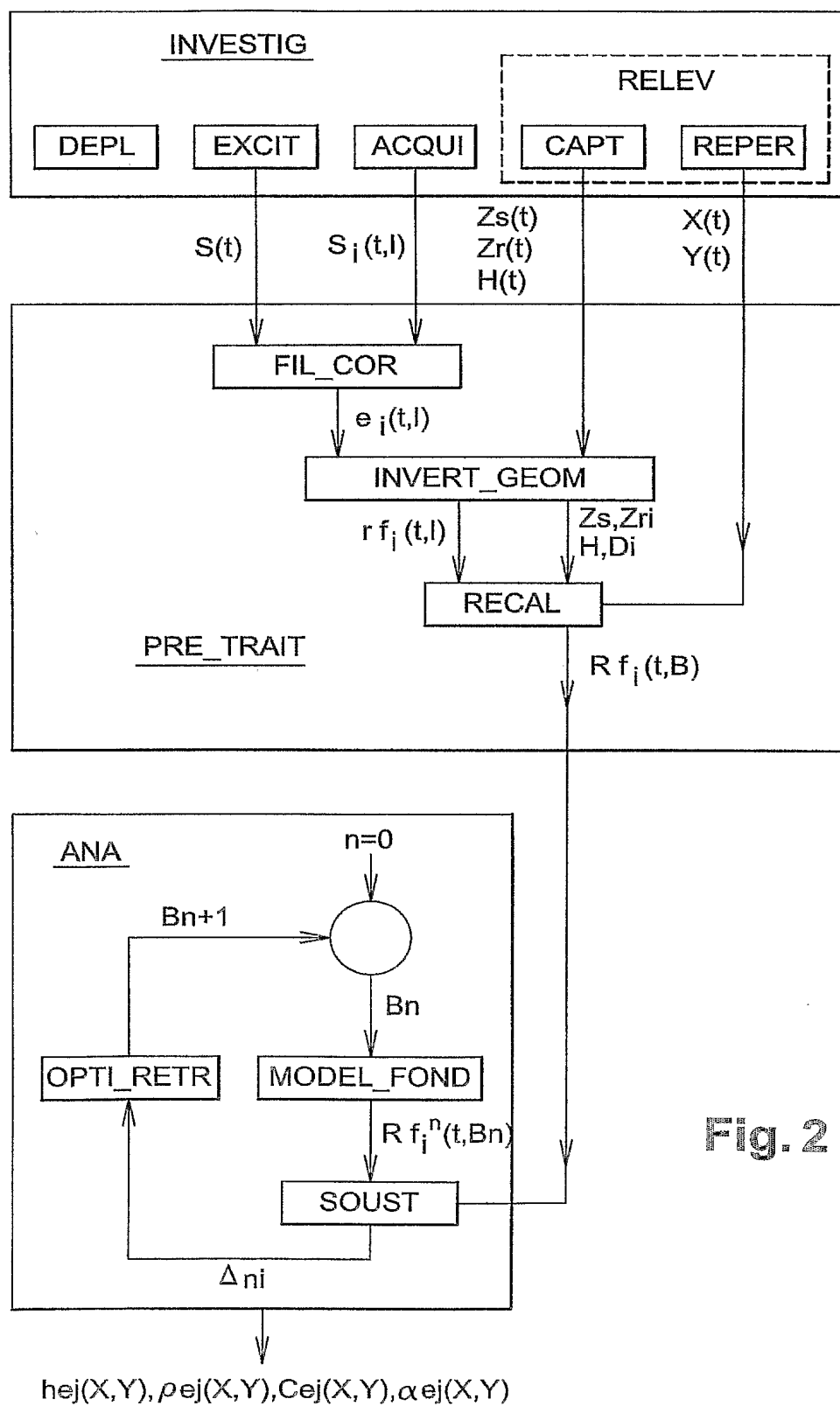
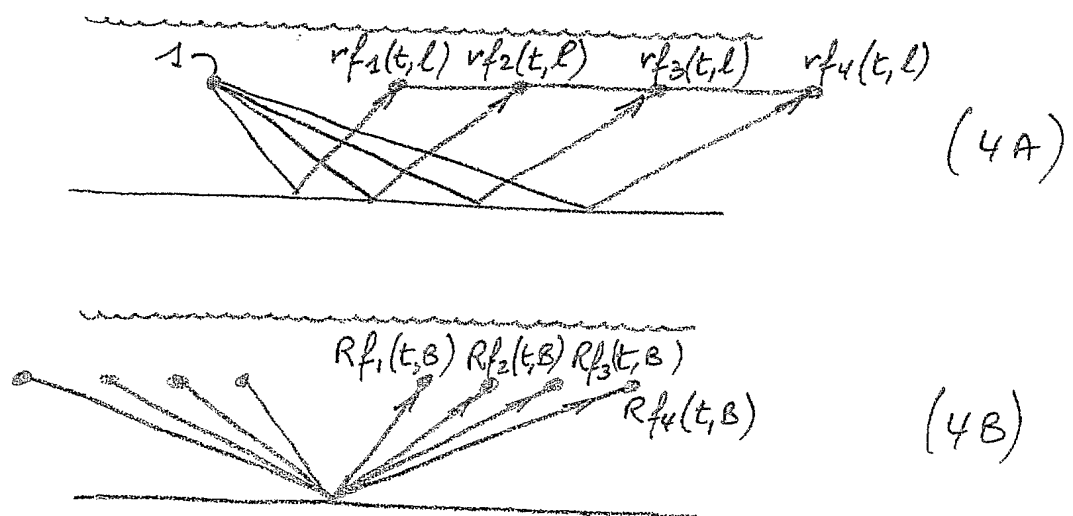
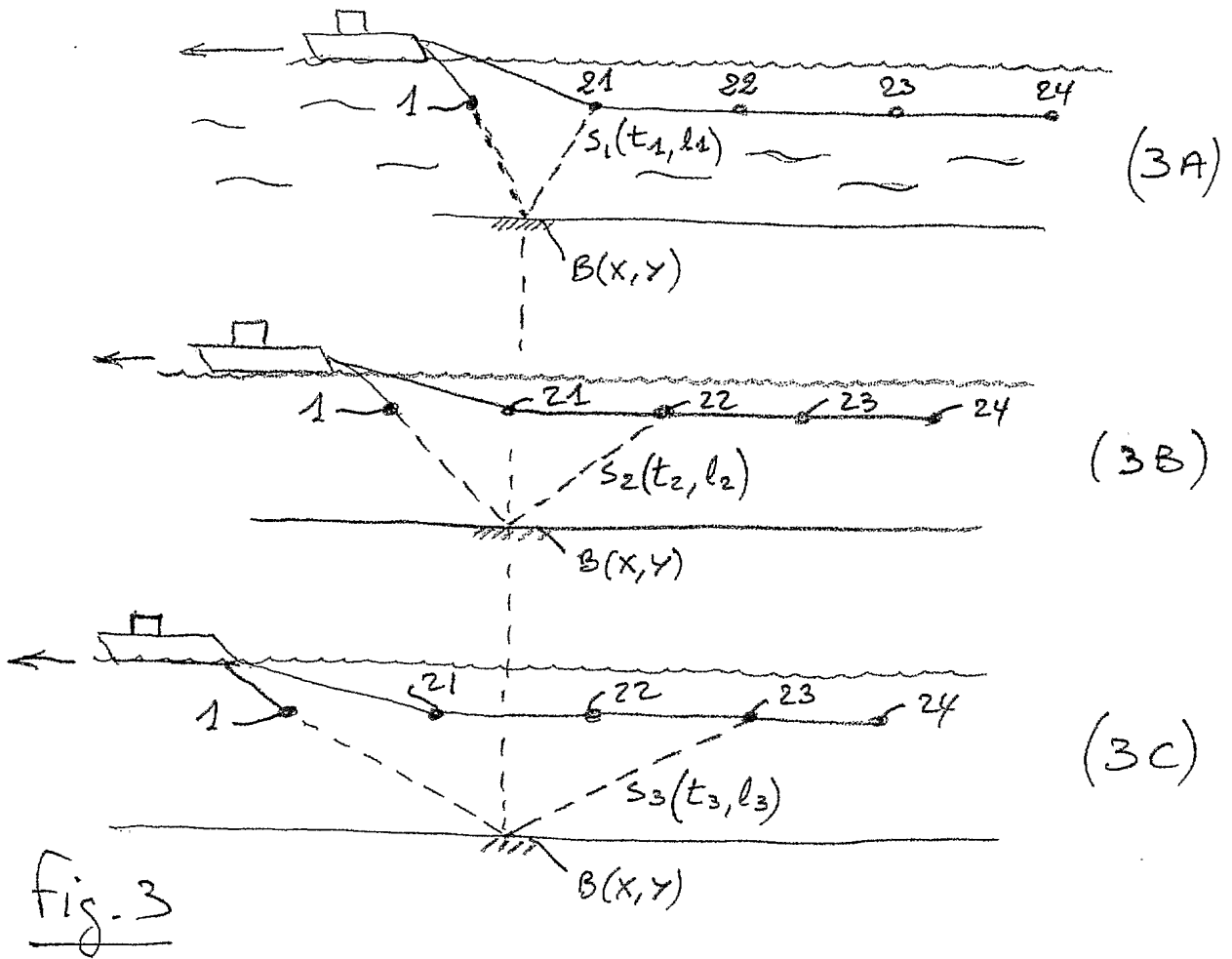
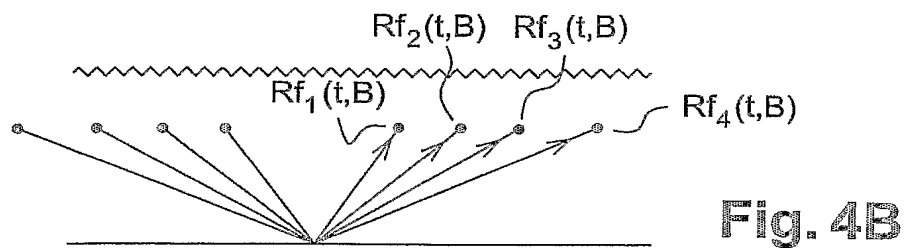
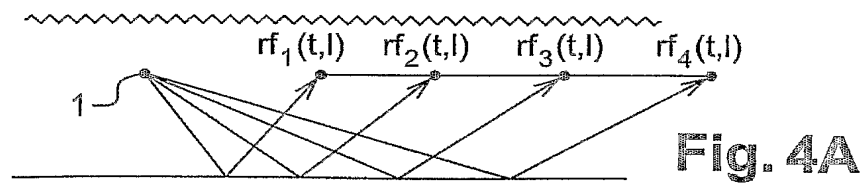
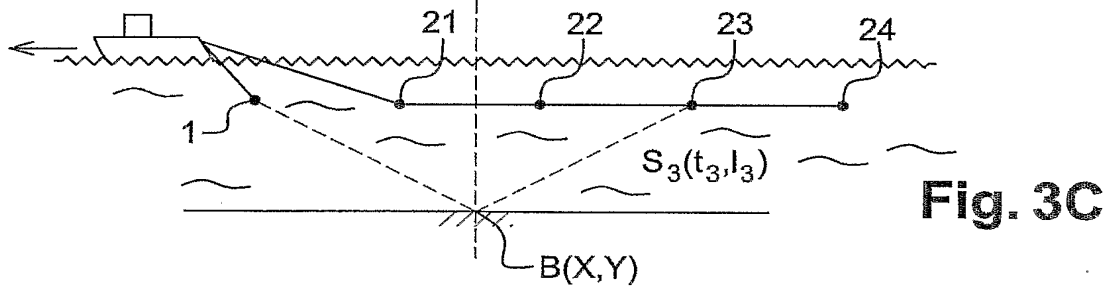
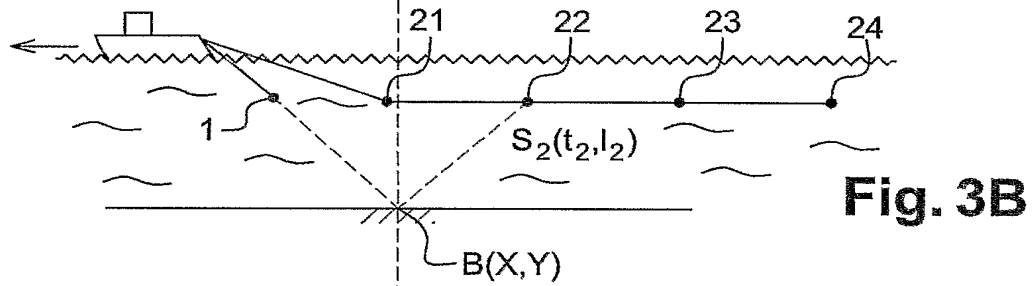
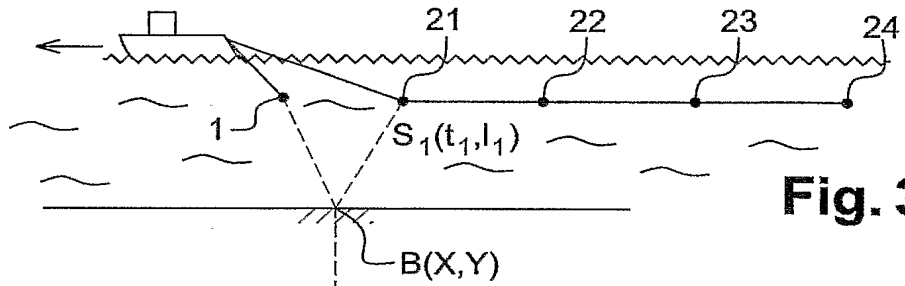


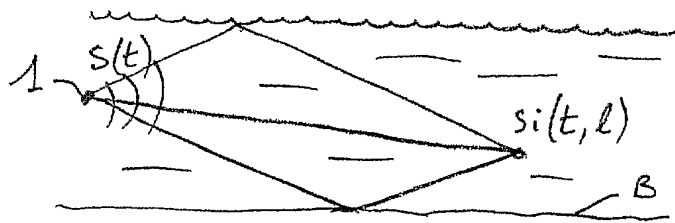
Fig. 2



3 / 6



(5A)



$e_i(t, l)$

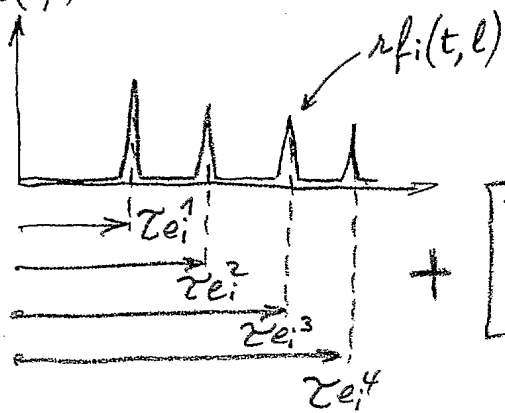
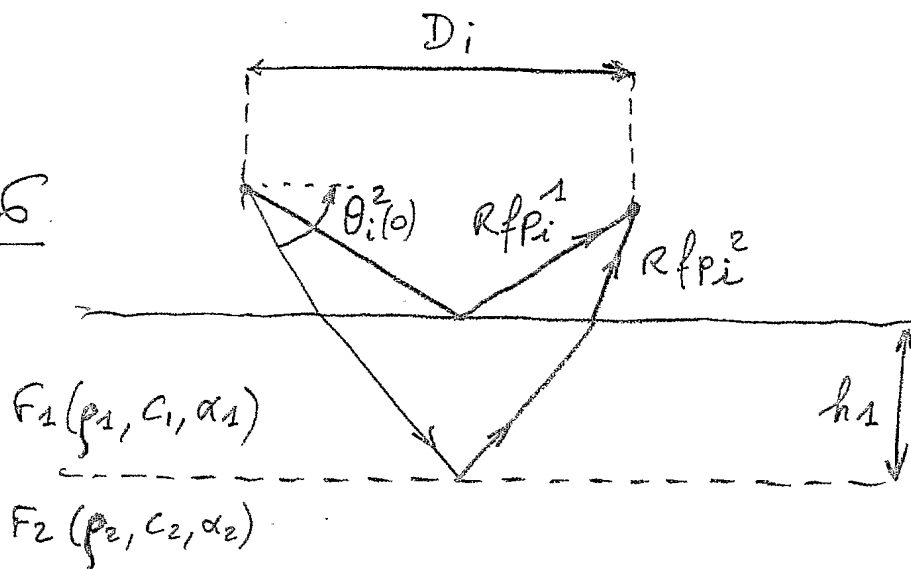


Fig. 5

(5B)

$$+ \begin{bmatrix} \hat{z}_r, \hat{z}_s, \hat{h} \\ x, y \end{bmatrix} \rightarrow [D_i, H, z_{ri}, z_s] \\ \downarrow \\ B_i(x, y) \leftarrow Rf_i(t, B)$$

Fig. 6



4 / 6

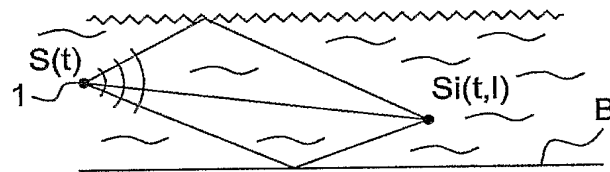


Fig. 5A

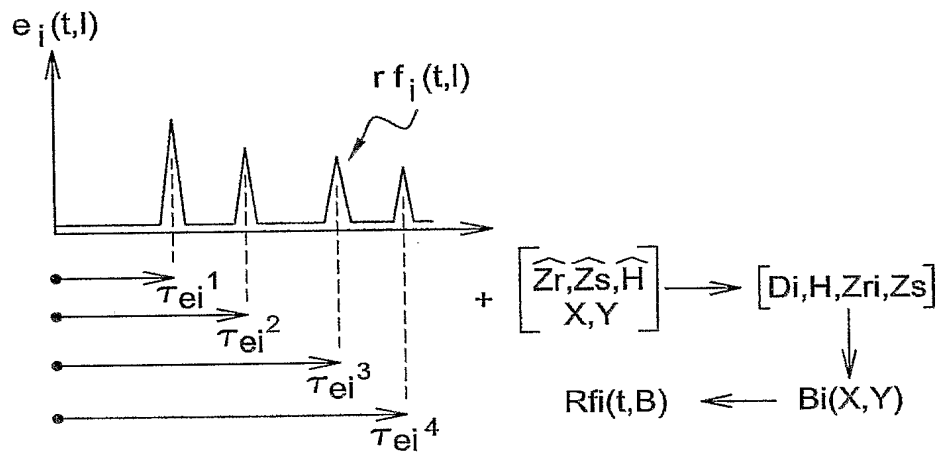


Fig. 5B

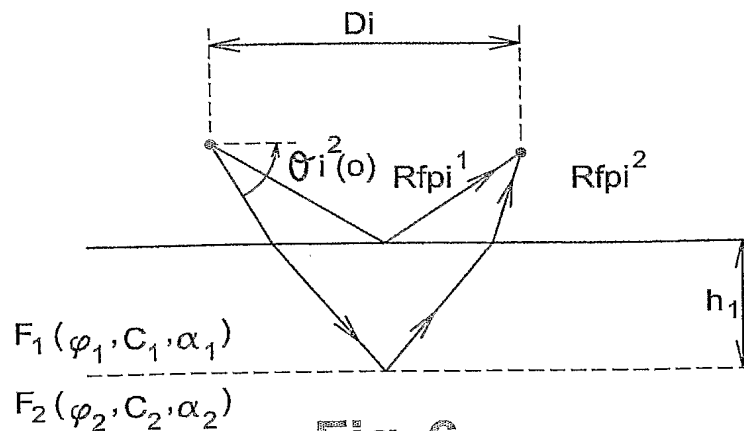
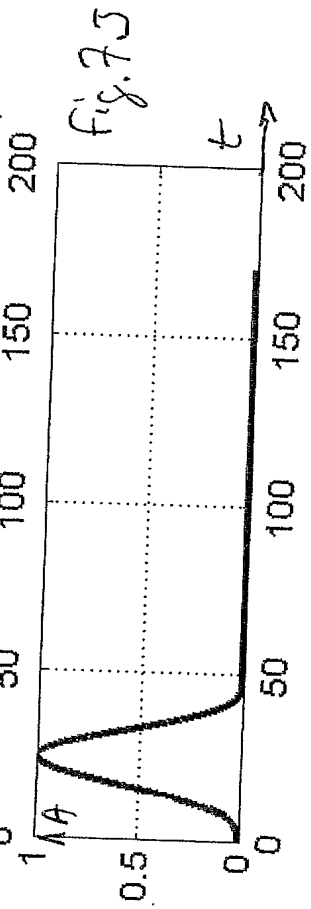
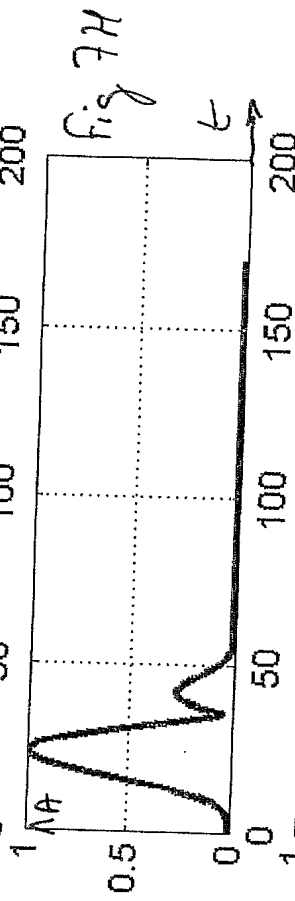
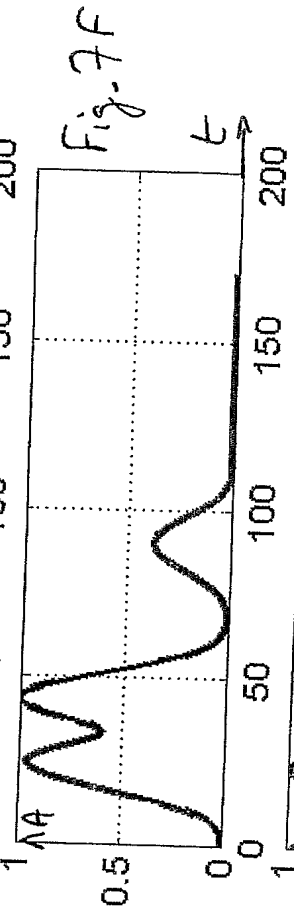
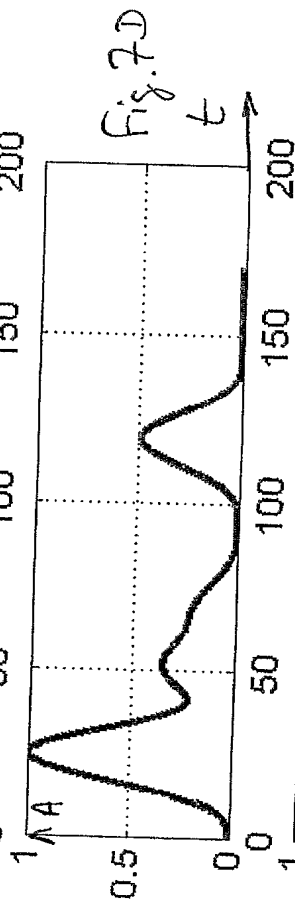
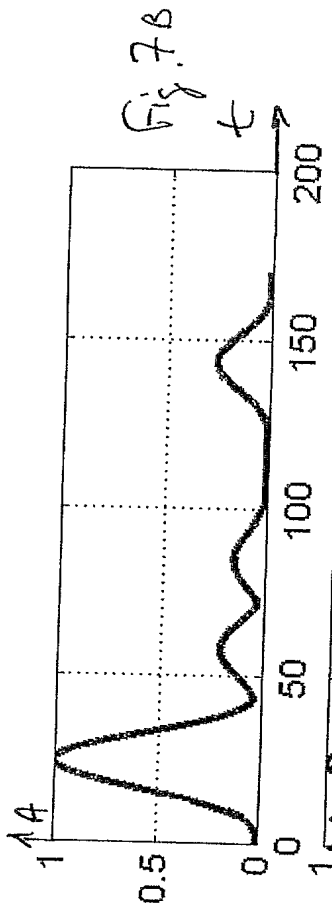
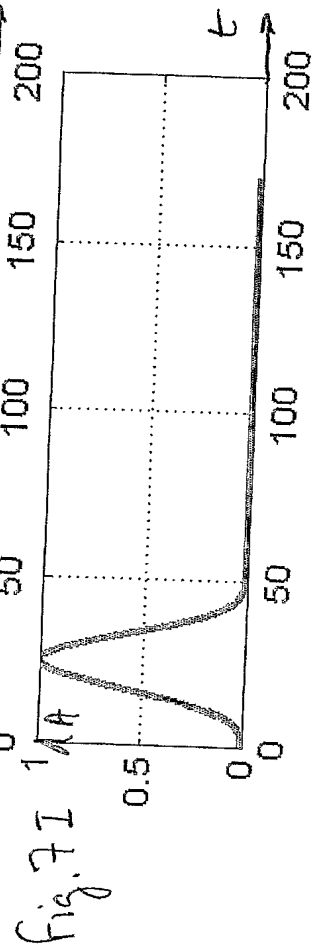
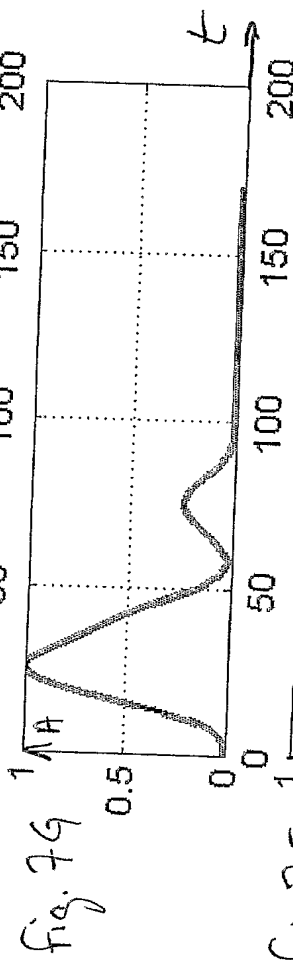
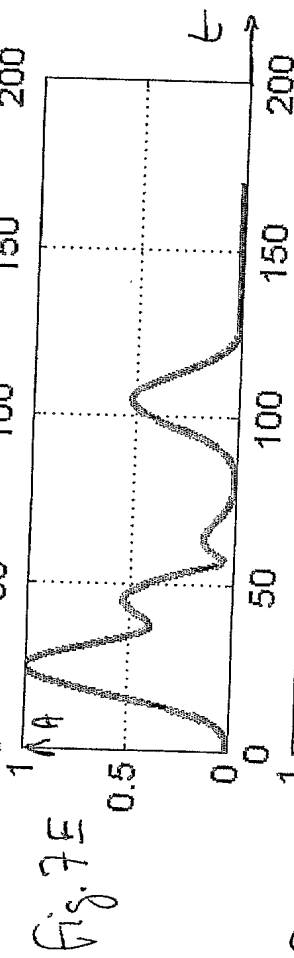
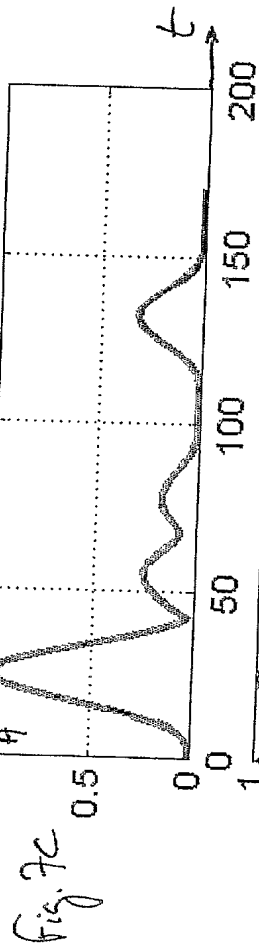
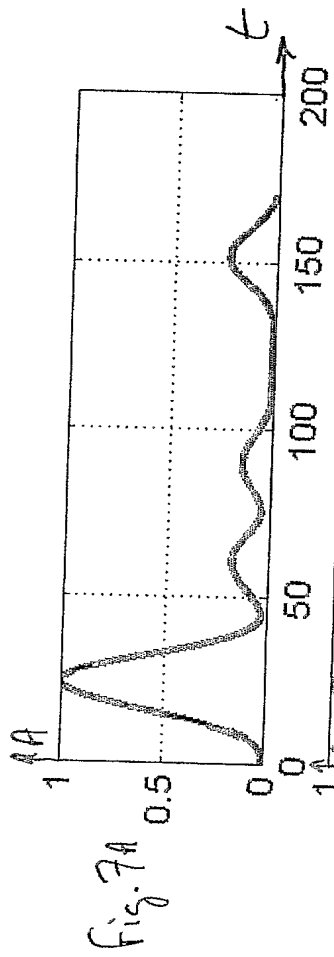
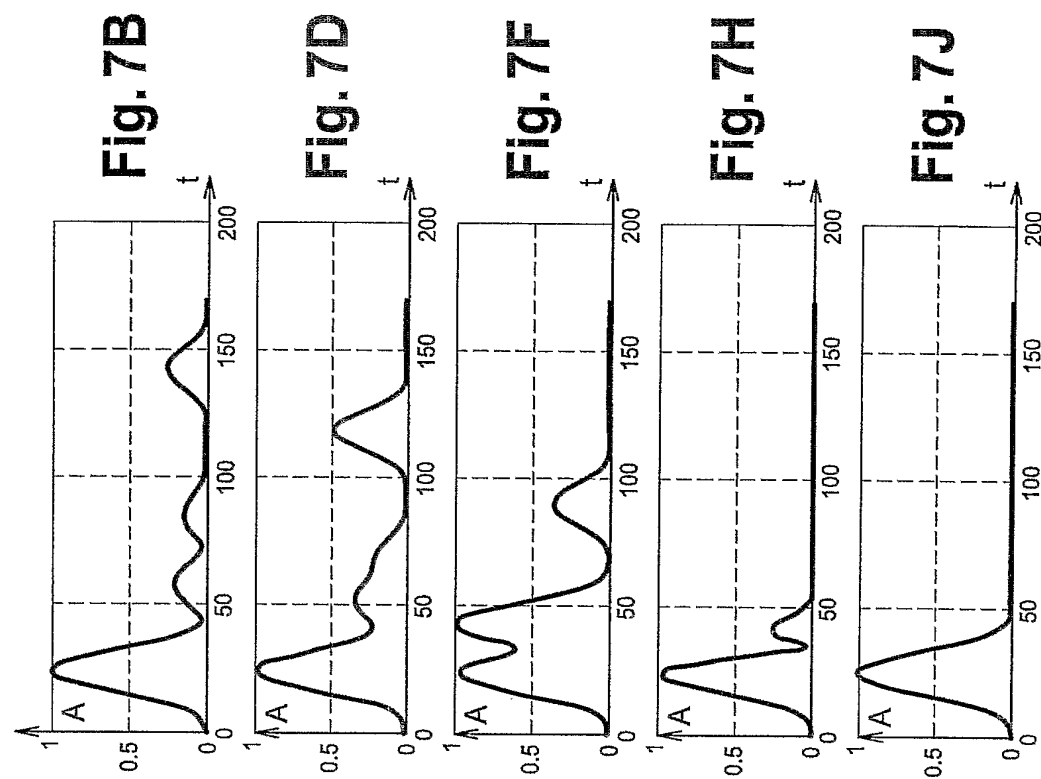
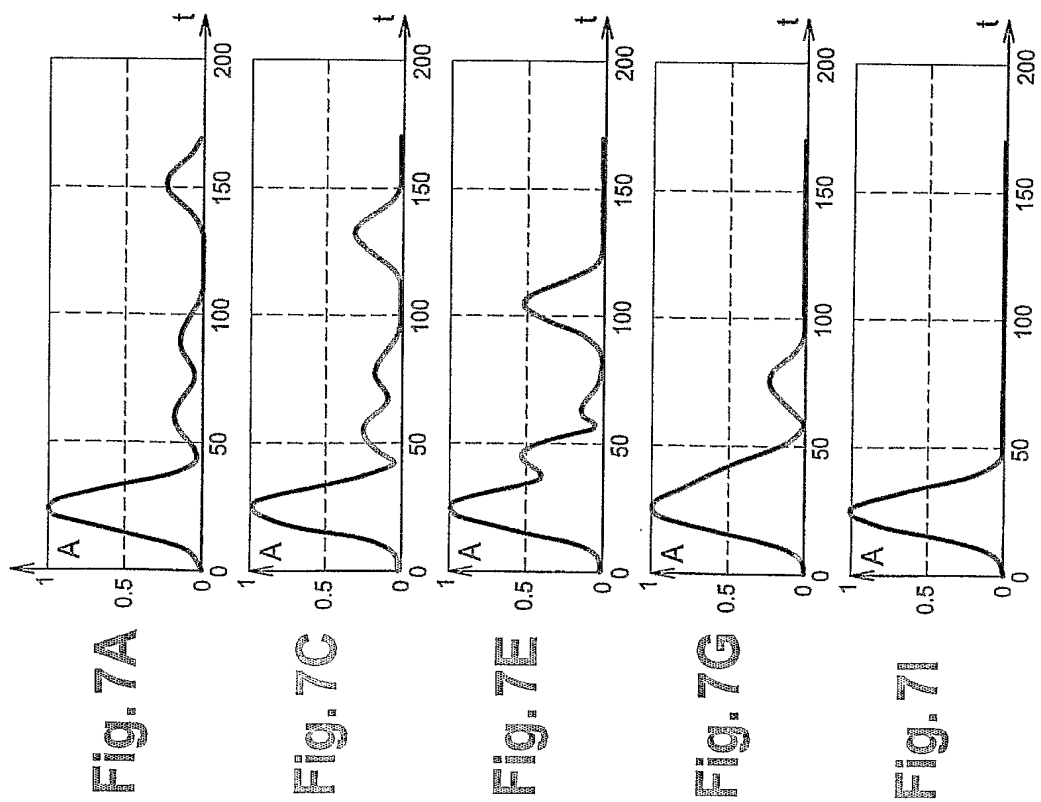
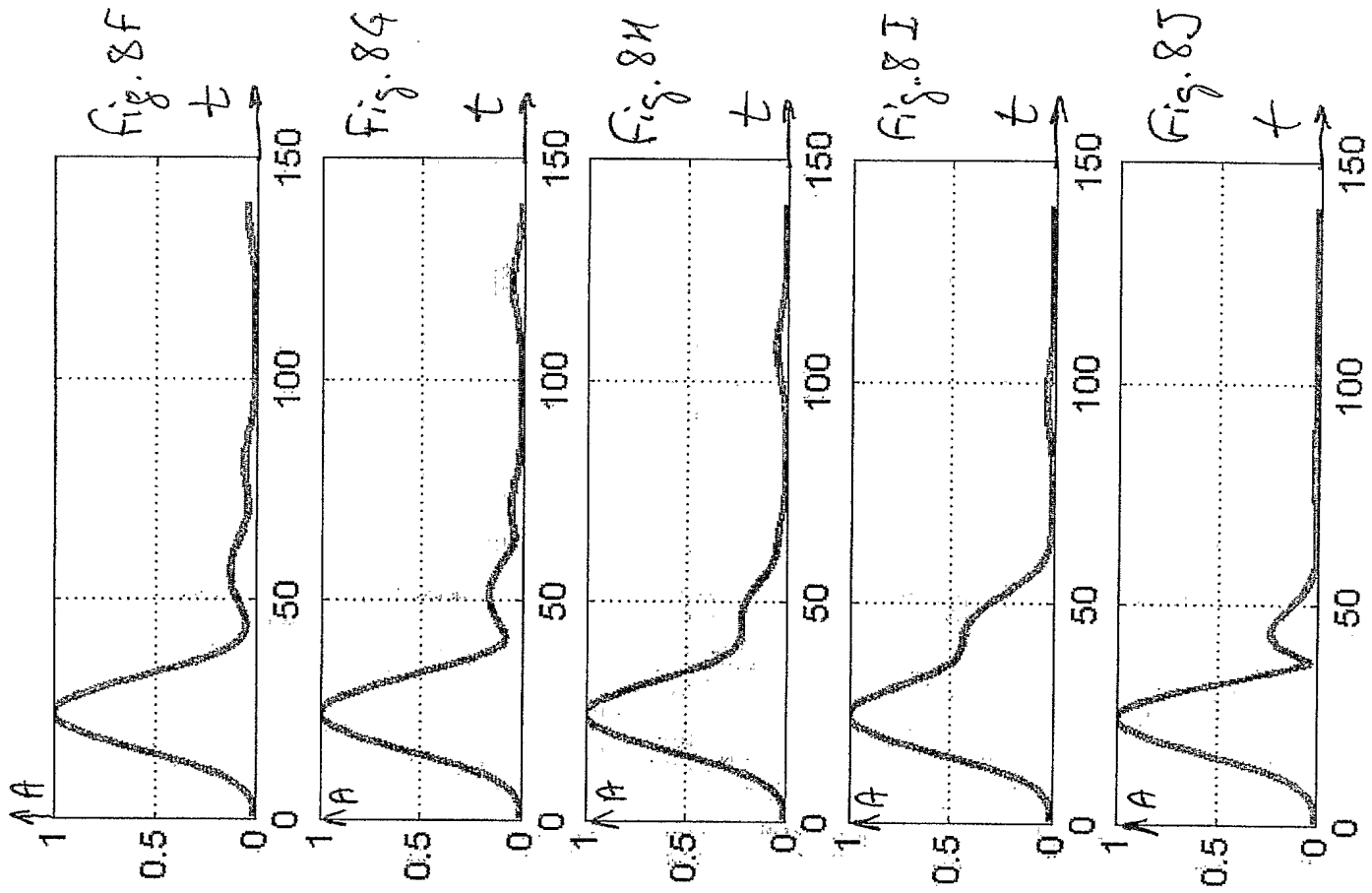
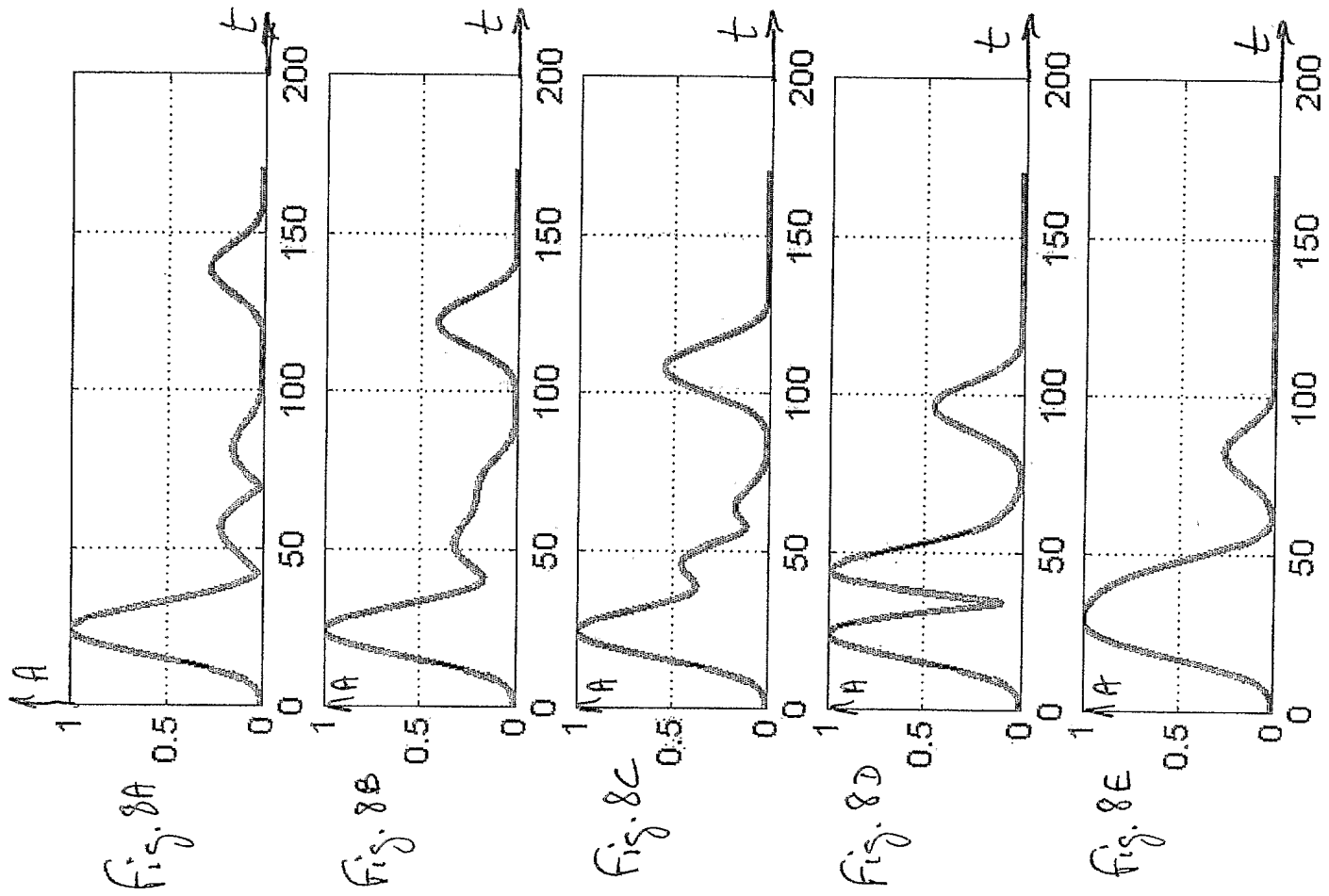
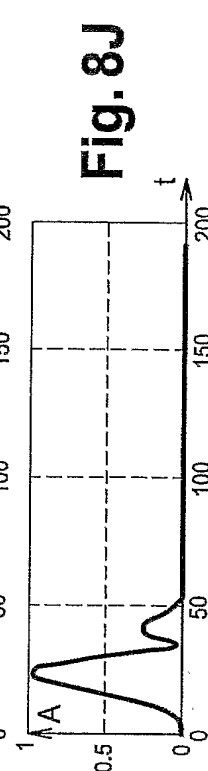
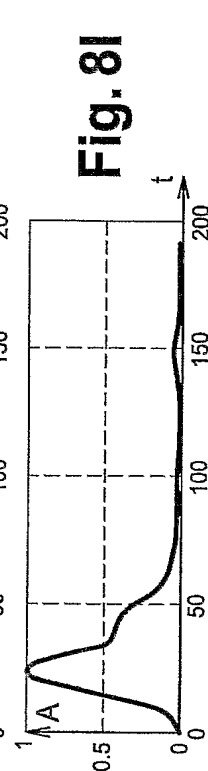
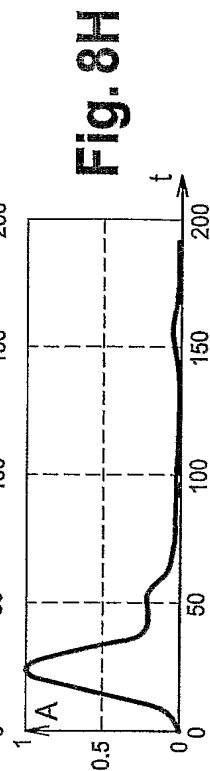
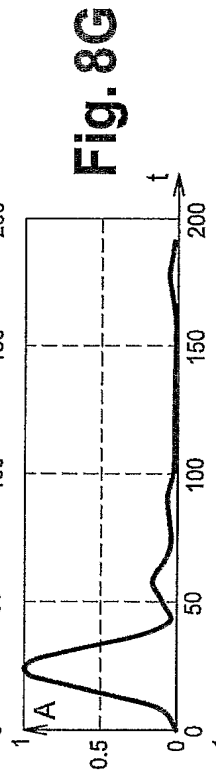
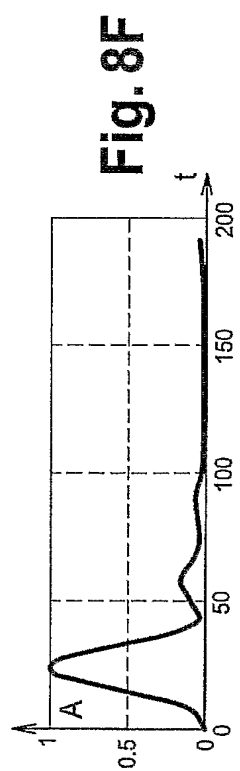
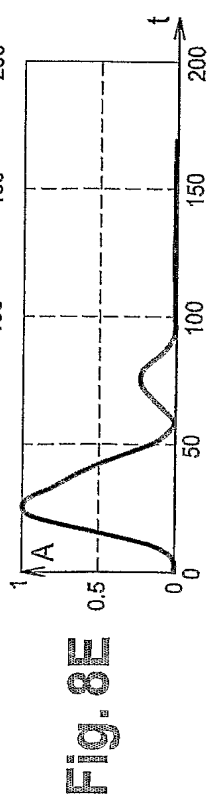
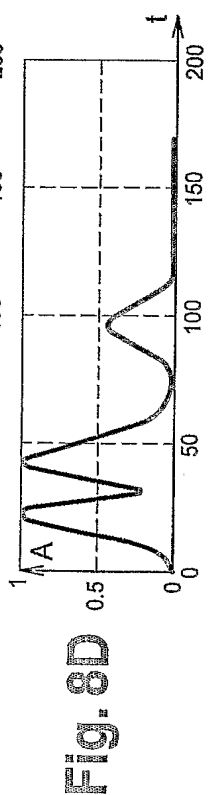
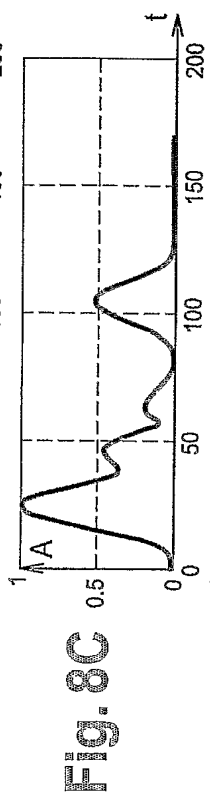
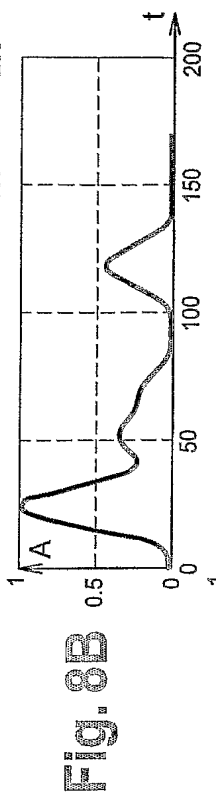
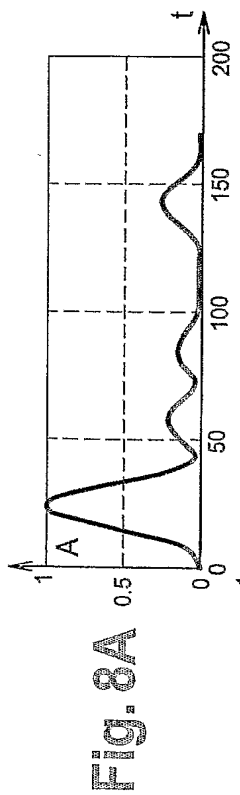


Fig. 6











26 bis, rue de Saint Pétersbourg - 75800 Paris Cedex 08

Pour vous informer : INPI DIRECT

N° Indigo 0 825 83 85 87
0,15 € TTC/mn

Télécopie : 33 (0)1 53 04 52 65

BREVET D'INVENTION**CERTIFICAT D'UTILITÉ**

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI



N° 11235*03

DÉSIGNATION D'INVENTEUR(S) Page N° 1.../1...

(À fournir dans le cas où les demandeurs et les inventeurs ne sont pas les mêmes personnes)

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire



DB 113 © W / 210103

Vos références pour ce dossier (facultatif)		017066 FR JPB/YL
N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL		0202554
TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum)		
Procédé de caractérisation géotechnique d'un fond subaquatique, utilisant une onde acoustique à large bande et à rasance multiple		
LE(S) DEMANDEUR(S) :		
DEMOULIN Xavier 21 rue Ed. Manet 56260 Larmor-Plage FRANCE		
DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) :		
1	Nom	DEMOULIN
	Prénoms	Xavier
Adresse	Rue	21 rue Ed. Manet
	Code postal et ville	56160 Larmor-Plage
Société d'appartenance (facultatif)		
2	Nom	SARZEAUD
	Prénoms	Olivier
Adresse	Rue	La Chaussée
	Code postal et ville	44131 Petit-Mars
Société d'appartenance (facultatif)		
3	Nom	
	Prénoms	
Adresse	Rue	
	Code postal et ville	
Société d'appartenance (facultatif)		
S'il y a plus de trois inventeurs, utilisez plusieurs formulaires. Indiquez en haut à droite le N° de la page suivi du nombre de pages.		
DATE ET SIGNATURE(S) DU (DES) DEMANDEUR(S) OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire)		
BENTZ Jean-Paul 99.0308		



